



Relazione sulle soluzioni di intervento proposte e concordate per la sostituzione delle lavorazioni previste in progetto con altre in alternativa per la messa in sicurezza e miglioramento strutturale dell'edificio con l'impiego di **materiali e tecnologie G&P Intech**, azienda veneta di Altavilla Vicentina (VI).



Gli interventi di progetto per i quali si propone un'alternativa:

- 1 – RINFORZO STRUTTURALI DI TRAVI IN C.A. (previsto in FRCC con rete di carbonio e malta;
- 2 – RINFORZO STRUTTURALE IL UN SINGOLO PILASTRO IN C.A. (previsto con avvolgimento sui quattro lati del pilastro)

1 RINFORZO STRUTTURALE DI TRAVI IN C.A.

Il rinforzo delle travi prevedeva, inizialmente, un intervento in FRCC con reti in tessuto PBO e malta pozzolanica-cementizia R2.

G&P intech srl
Via Retrone, 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)
Tel. 0444/522797 – Fax 0444/348692

C. F. e Partita IVA 03580250243 - Numero REA VI-0336685 - Capitale sociale € 100.000 i.v.

E-mail: info@gpintech.com - Sito internet: www.gpintech.com

Marchi registrati: Dual Seal® - FRP System® - Carbophalt® - Glasphalt® - Matacryn® - Superstop® - Concrete Rock® - Floor System®



Successivamente su proposta dell'impresa esecutrice dei lavori, accettata dalla DL, si è sostituito il PBO con rete in fibra di carbonio, mantenendo inalterato il sistema di posa, sempre in FRCM con malta pozzolanica-cementizia R2.

Tale lavorazione di progetto comunque prevede la completa fasciatura della trave con conseguente demolizione di muratura, resa ancora più invasiva dalla presenza di infissi e/o impianti.

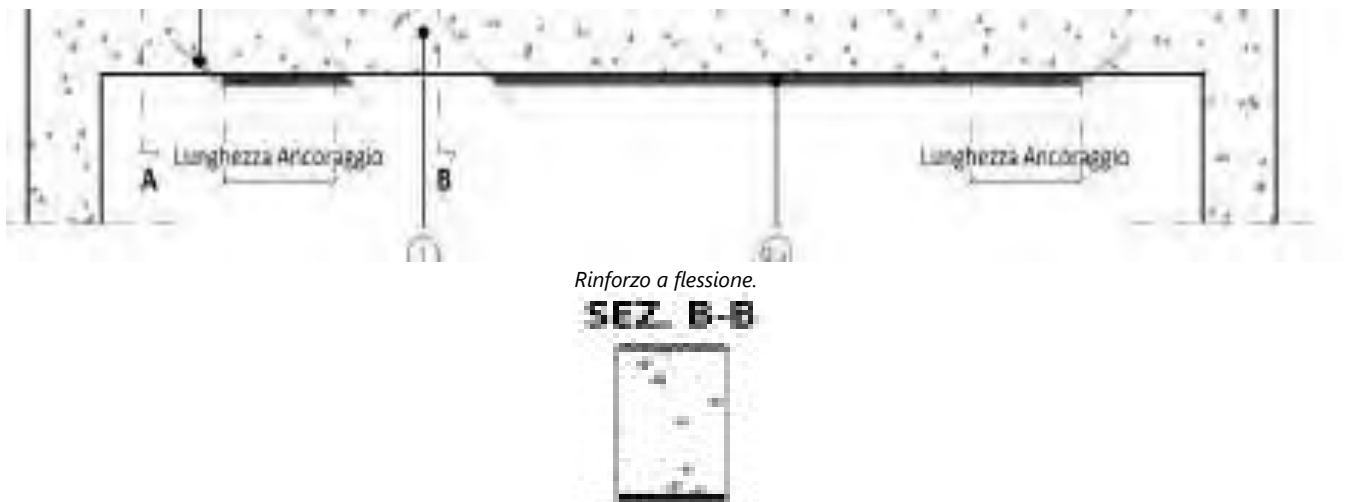
Pertanto, soprattutto per non arrecare più disagio alle persone durante le lavorazioni, si è resa necessaria la ricerca di un'altra soluzione di intervento che evitasse le demolizioni, che vado qui di seguito ad illustrare.

Rinforzo travi

Rinforzo a flessione di travi in c.a. e c.a.p. con **tecnologia FRP - SRP System** realizzata lamine pultruse in fibra di carbonio impregnati in situ con resina epossidica.

Disponendo le lamine pultruse in fibra di carbonio all'intradosso di travi in c.a. o c.a.p. è possibile rinforzare a flessione gli elementi strutturali soggetti ad un momento flettente di progetto maggiore della corrispondente resistenza. Invece, disponendo le strisce di tessuto ad U-Wrap agli estremi della trave è possibile rinforzare a taglio gli elementi strutturali soggetti ad una forza di taglio maggiore della corrispondente resistenza.

Di seguito si riportano le fasi applicative dell'intervento di rinforzo strutturale:



G&P intech srl

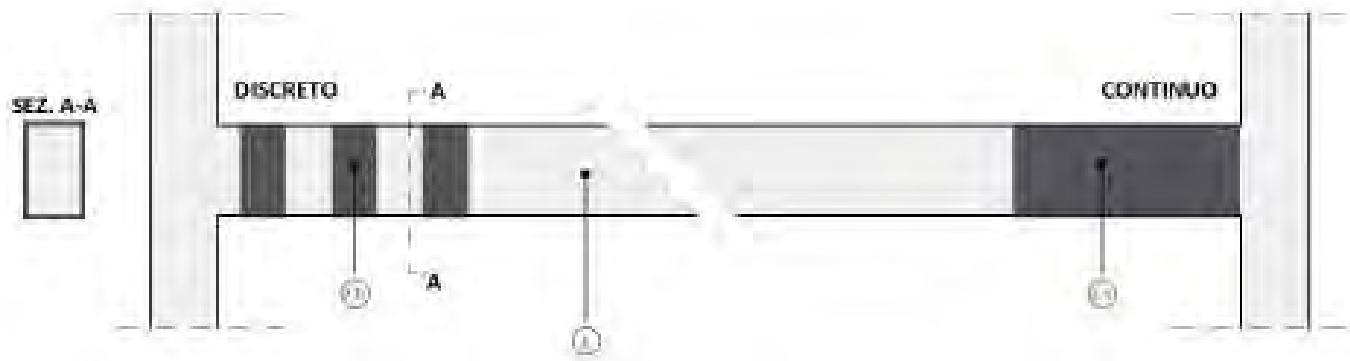
Via Retrone, 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)

Tel. 0444/522797 - Fax 0444/348692

C. F. e Partita IVA 03580250243 - Numero REA VI-0336685 - Capitale sociale € 100.000 i.v.

E-mail: info@gpintech.com - Sito internet: www.gpintech.com

Marchi registrati: Dual Seal® - FRP System® - Carbophalt® - Glasphalt® - Matacryn® - Superstop® - Concrete Rock® - Floor System®



Rinforzo a taglio U-Wrap.



FASI DI RINFORZO TRAVI IN C.A. – C.A.P.:

1. Preparazione del supporto con rimozione dell'eventuale intonaco e di porzioni incoerenti di calcestruzzo; eventuale ripristino delle armature ossidate, integrazione dell'area persa e passivazione delle stesse mediante passivante **FERROSAN**; ricostruzione delle superfici ammalorate di calcestruzzo con malta cementizia bicomponente **CONCRETE ROCK V2**. Arrotondamento degli spigoli con raggio minimo $r = 2.5 \text{ cm}$; **2.**

2.a

G&P intech srl
Via Retrone, 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)
Tel. 0444/522797 – Fax 0444/348692

C. F. e Partita IVA 03580250243 - Numero REA VI-0336685 - Capitale sociale € 100.000 i.v.

E-mail: info@gpintech.com - Sito internet: www.gpintech.com

Marchi registrati: Dual Seal® - FRP System® - Carbophalt® - Glasphalt® - Matacryl® - Superstop® - Concrete Rock® - Floor System®



RINFORZO A FLESSIONE:

Applicazione del primer epossidico **RESIN PRIMER** e del rinforzo a flessione con lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK 150/2000** Classe C150/2300 CVT, fissate con adesivo tixotropico in pasta **RESIN 90**.

NB: il rinforzo in questo caso va applicato all'intradosso 2.b

RINFORZO A TAGLIO:

Applicazione del primer epossidico **RESIN PRIMER** e quindi di strisce di tessuto disposte ad "U" per il rinforzo a taglio delle estremità della trave mediante tessuti in fibra di carbonio a basso modulo elastico **C-SHEET 240/300** classe 210C CVT, impregnati in situ con resina epossidica **RESIN 75**;

Eventuali finiture con intonaco civile o di altro tipo, previo spolvero al quarzo su resina ancora fresca



G&P intech srl

Via Retrone, 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)

Tel. 0444/522797 - Fax 0444/348692

C. F. e Partita IVA 03580250243 - Numero REA VI-0336685 - Capitale sociale € 100.000 i.v.

E-mail: info@gpintech.com - Sito internet: www.gpintech.com

Marchi registrati: Dual Seal® - FRP System® - Carbophalt® - Glasphalt® - Matacryn® - Superstop® - Concrete Rock® - Floor System®

2 RINFORZO STRUTTURALE DI PILASTRO SU TRE LATI



Il rinforzo del pilastro prevede, un intervento in FRP con tessuto in fibra di carbonio messo in opera in matrice organica (resina) con avvolgimento completo del pilastro stesso. Tale lavorazione di progetto per la fasciatura del pilastro con avvolgimento completo comporta la demolizione delle murature laterali con interessamento degli infissi presenti e relativi cassonetti. La demolizione può essere evitata fasciando il pilastro su tre lati, con risvolto delle fasce sulla

G&P intech srl
Via Retrone, 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)
Tel. 0444/522797 - Fax 0444/348692

C. F. e Partita IVA 03580250243 - Numero REA VI-0336685 - Capitale sociale € 100.000 i.v.

E-mail: info@gpintech.com - Sito internet: www.gpintech.com

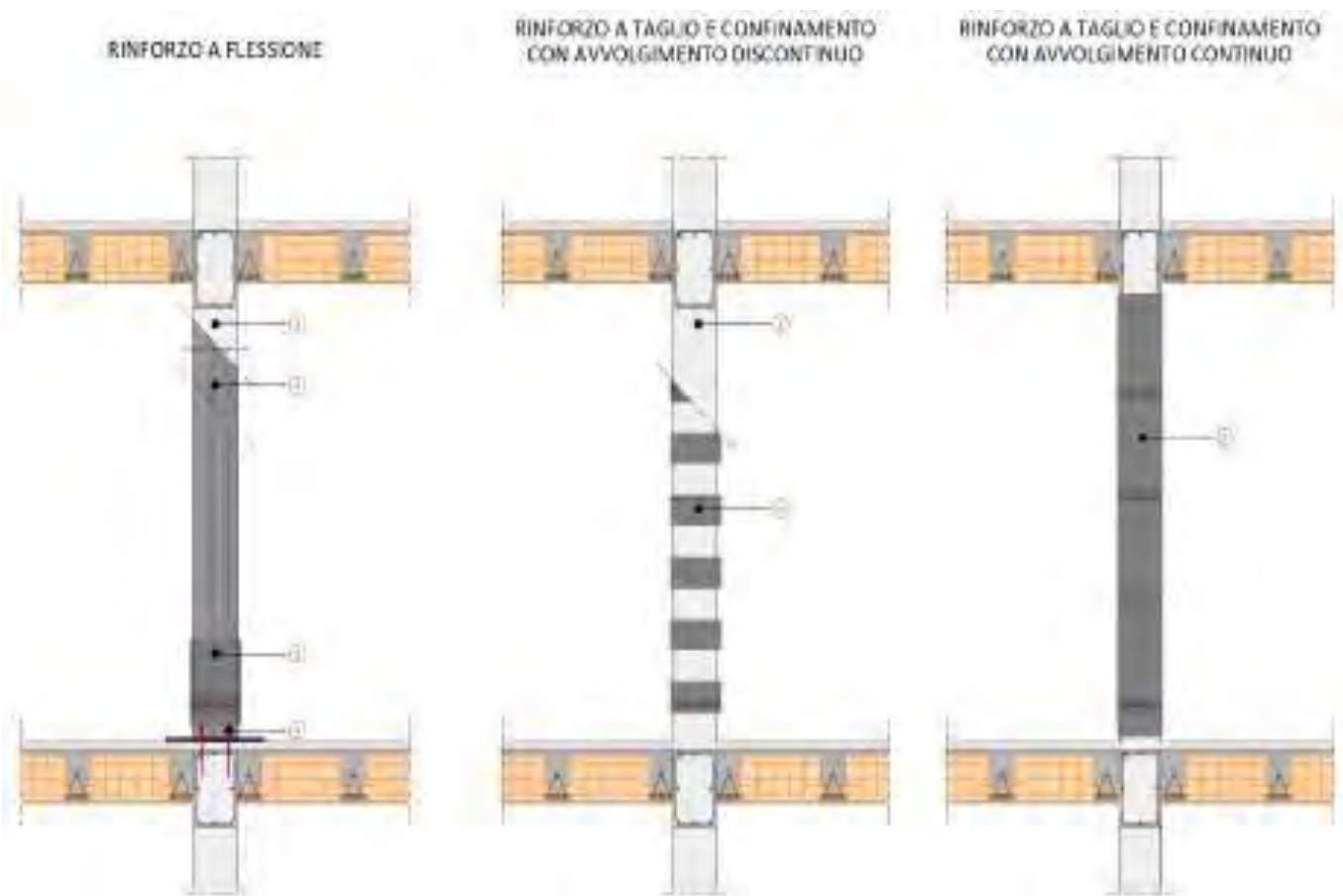
Marchi registrati: Dual Seal® - FRP System® - Carbophalt® - Glasphalt® - Matacryn® - Superstop® - Concrete Rock® - Floor System®



muratura laterale ed ogni singola fascia (larghezza cm 50) ancorata sulla muratura stessa con un connettore a fiocco passante da un lato del pilastro (zona finestra) e non passante dall'altro lato. Vado qui di seguito ad illustrare la soluzione su tre lati proposta:

Rinforzo pilastri L'intervento di rinforzo strutturale antisismico di pilastri in calcestruzzo armato con tecnologia FRP System realizzata con tessuti in fibra di carbonio impregnati in situ con resina epossidica bicomponente, ha come obiettivo principale quello di incrementare la resistenza a pressoflessione e la duttilità degli elementi.

L'intervento è previsto in sommità ed alla base del pilastro con avvolgimento continuo su tre lati, mentre nella parte centrale con avvolgimento discontinuo su tre lati, previo posizionamento in verticale e per tutt'altezza sui due angoli del pilastro di fascia di carbonio altezza cm 20 risvoltata metà da un lato e metà sull'altro lato.



(a) Rinforzo a flessione; (b) Rinforzo a taglio e confinamento con avvolgimento discontinuo; (c) Rinforzo a taglio e confinamento con avvolgimento continuo.

G&P intech srl

Via Retrone, 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)

Tel. 0444/522797 - Fax 0444/348692

C. F. e Partita IVA 03580250243 - Numero REA VI-0336685 - Capitale sociale € 100.000 i.v.

E-mail: info@gpintech.com - Sito internet: www.gpintech.com

Marchi registrati: Dual Seal® - FRP System® - Carbophalt® - Glasphalt® - Matacryn® - Superstop® - Concrete Rock® - Floor System®



FASI DI RINFORZO PILASTRI IN C.A.:

1. Preparazione del supporto con rimozione dell'eventuale intonaco e di porzioni incoerenti di calcestruzzo; eventuale ripristino delle armature ossidate, integrazione dell'area persa e passivazione delle stesse mediante passivante **FERROSAN**; ricostruzione delle superfici ammalorate di calcestruzzo con malta cementizia bicomponente **CONCRETE ROCK V2**.
Arrotondamento degli spigoli con raggio minimo $r = 2.5$ cm;
2. Applicazione del primer epossidico **RESIN PRIMER** e del rinforzo a flessione con tessuti in fibra di carbonio a basso modulo elastico **C-SHEET 240/600** classe 210C CVT.
3. Applicazione di strisce di tessuto in fibra di carbonio **C-SHEET 240/600** classe 210C CVT, impregnati in situ con resina epossidica **RESIN 75**, in avvolgimento discontinuo o continuo per il rinforzo a taglio e a confinamento del pilastro, su tre lati del pilastro ed ancoraggio delle singole fasce, risvoltate sulla muratura per circa 20 cm, con connettori a fiocco, con sovrapposizioni ed orizzontali di 20 cm;
4. Per l'ancoraggio alle estremità del rinforzo flessionale disporre dei connettori a fiocco. Tali connettori possono essere in fibra di carbonio **CFIX** o in fibra aramidica **AFIX** per sistemi FRP inghisati nel foro adeguatamente predisposto con adesivo **RESIN 75**.
5. Eventuali finiture con intonaco civile o di altro tipo, previo spolvero al quarzo su resina ancora fresca.

NOTA

- L'importanza dei connettori è fondamentale per migliorare l'ancoraggio all'estremità delle strisce di tessuto. Il posizionamento dei connettori deve avvenire in maniera da garantire anche la trasmissione degli sforzi alle strutture circostanti.

Ing. Luciano Di Paolo

G&P intech srl

Via Retrone, 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)

Tel. 0444/522797 - Fax 0444/348692

C. F. e Partita IVA 03580250243 - Numero REA VI-0336685 - Capitale sociale € 100.000 i.v.

E-mail: info@gpintech.com - Sito internet: www.gpintech.com

Marchi registrati: Dual Seal® - FRP System® - Carbophalt® - Glasphalt® - Matacryn® - Superstop® - Concrete Rock® - Floor System®

Altavilla Vicentina, 11/06/2025

Oggetto: Rinforzo per adeguamento sismico edificio in c.a.

Predimensionamento dei rinforzi strutturali con tecnologie G&P intech.

1 INTRODUZIONE

La presente relazione tecnica propone un metodo di rinforzo dei nodi trave-pilastro mediante tecnologia FRP System.

Si riporta nel seguito un esempio di dimensionamento di massima dei rinforzi da eseguirsi sui nodi trave-pilastro, con particolare attenzione sui nodi d'angolo e sui nodi intermedi, garantendo un buon comportamento d'insieme del nodo e un significativo incremento di duttilità, resistenza a taglio di travi e pilastri convergenti nel nodo ed un confinamento delle estremità dei pilastri.

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Per la progettazione del presente intervento di consolidamento è stata considerata la normativa tecnica vigente in materia e la relativa circolare esplicativa:

- D.M. 17/01/18 “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, in seguito “NTC18”.
- Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21/01/19 “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”, in seguito “Circolare”.

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato al capitolo 12 delle stesse NTC18):

- CNR-DT 200 R1/2013 “Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati - Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie”.
- Decreto del Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici n.293 del 29.05.2019, recante “Linee guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti”.

G&P intech srl

Via Retrone, 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)

Tel. 0444/522797 – Fax 0444/348692

C. F. e Partita IVA 03580250243 - Numero REA VI-0336685 - Capitale sociale € 100.000 i.v.

E-mail: info@gpintech.com - Sito internet: www.gpintech.com

Marchi registrati: Dual Seal® - FRP System® - Steel Net® - Armophalt® - Matacyl® - Superstop® - Concrete Rock® - Floor System® - GP Sunzenit® - Kryton® - Damp Stop® - Cemesan®

3 RINFORZI NODALI

I dati utilizzati per il calcolo sono stati ricavati dalle relazioni fornite dal Professionista che ha effettuato i calcoli strutturali sull'edificio oggetto di intervento.

Per le verifiche di rinforzo nodale sono stati considerati i valori relativi ai pilastri n. 1-7-10 del Piano Terra, e dei pilastri n. 2-5-10-49-50-51-52-55-69-72-77-78 del Piano Rialzato. Le dimensioni degli elementi trave e pilastro insistenti sui pilastri sopra elencati e presi in considerazione, sono riportati di seguito:

Pilastri n. 1-7-10 del Piano Terra

Pilastro:

Sezione 30x50, armatura A_{s2} 4Ø14 superiore e A_{s1} 4Ø14, staffe Ø12/100

Travi:

Su pilastro 1:

Trave 1-2 : Sezione 30x25 cm – Armatura $A_{s1} = 8,04 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 8,04 \text{ cm}^2$

Trave 1-4 : Sezione 30x50 cm - Armatura $A_{s1} = 10,05 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 10,05 \text{ cm}^2$

Su Pilastro 7-10:

Trave 7-10 : Sezione 120x25 cm – Armatura $A_{s1} = 12,06 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 12,06 \text{ cm}^2$

Trave 7-5 : Sezione 120x25 cm - Armatura $A_{s1} = 10,05 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 10,05 \text{ cm}^2$

Trave 10-26 : Sezione 120x25 cm – Armatura $A_{s1} = 22,12 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 22,12 \text{ cm}^2$

Pilastri n. 2-5-10-49-50-51-52-55-69-72-77-78 del Piano Rialzato

Pilastro:

Sezione 30x50, armatura A_{s2} 4Ø14 superiore e A_{s1} 4Ø14, staffe Ø12/100

Travi:

Su pilastro 2:

Trave 1-2 : Sezione 30x35 cm – Armatura $A_{s1} = 6,03 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 6,03 \text{ cm}^2$

Trave 2-3 : Sezione 30x35 cm - Armatura $A_{s1} = 6,03 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 6,03 \text{ cm}^2$

Su pilastro 5:

Trave 2-5 : Sezione 50x35 cm – Armatura $A_{s1} = 6,03 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 6,03 \text{ cm}^2$

Trave 5-10 : Sezione 50x35 cm - Armatura $A_{s1} = 10,05 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 10,05 \text{ cm}^2$

G&P intech srl

Via Retrone, 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)

Tel. 0444/522797 – Fax 0444/348692

C. F. e Partita IVA 03580250243 - Numero REA VI-0336685 - Capitale sociale € 100.000 i.v.

E-mail: info@gpintech.com - Sito internet: www.gpintech.com

Marchi registrati: Dual Seal® - FRP System® - Steel Net® - Armophalt® - Matarayl® - Superstop® - Concrete Rock® - Floor System® - GP Sunzenit® - Kryton® - Damp Stop® - Cemesan®

Su pilastro 10:

Trave 10 - 5 : Sezione 30x35 cm – Armatura $A_{s1} = 10,05 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 10,05 \text{ cm}^2$

Trave 10 -26 : Sezione 50x35 cm - Armatura $A_{s1} = 10,05 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 10,05 \text{ cm}^2$

Su pilastro 49:

Trave 49 - 50 : Sezione 50x35 cm – Armatura $A_{s1} = 10,05 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 10,05 \text{ cm}^2$

Trave 49 - 60 : Sezione 50x35 cm - Armatura $A_{s1} = 4,02 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 4,02 \text{ cm}^2$

Su pilastro 50:

Trave 49-50 : Sezione 50x35 cm – Armatura $A_{s1} = 10,05 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 10,05 \text{ cm}^2$

Trave 50-51 : Sezione 50x35 cm - Armatura $A_{s1} = 10,05 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 10,05 \text{ cm}^2$

Su pilastro 51:

Trave 50-51 : Sezione 50x35 cm – Armatura $A_{s1} = 10,05 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 10,05 \text{ cm}^2$

Trave 51-52 : Sezione 50x35 cm - Armatura $A_{s1} = 10,05 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 10,05 \text{ cm}^2$

Su pilastro 52:

Trave 52-51 : Sezione 50x35 cm – Armatura $A_{s1} = 10,05 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 10,05 \text{ cm}^2$

Trave 52-53 : Sezione 50x35 cm - Armatura $A_{s1} = 8,04 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 8,04 \text{ cm}^2$

Su pilastro 55:

Trave 54-55 : Sezione 70x35 cm – Armatura $A_{s1} = 12,06 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 12,06 \text{ cm}^2$

Trave 55-56 : Sezione 120x35 cm - Armatura $A_{s1} = 16,08 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 16,08 \text{ cm}^2$

Su pilastro 69:

Trave 68-69 : Sezione 70x35 cm – Armatura $A_{s1} = 12,06 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 12,06 \text{ cm}^2$

Trave 69-70 : Sezione 120x35 cm - Armatura $A_{s1} = 14,07 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 14,07 \text{ cm}^2$

Su pilastro 72:

Trave 58-72 : Sezione 30x35 cm – Armatura $A_{s1} = 8,04 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 8,04 \text{ cm}^2$

Trave 72-78 : Sezione 30x35 cm - Armatura $A_{s1} = 8,04 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 8,04 \text{ cm}^2$

Su pilastro 77:

Trave 76-77 : Sezione 30x35 cm – Armatura $A_{s1} = 4,02 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 4,02 \text{ cm}^2$

Trave 77-78 : Sezione 30x50 cm - Armatura $A_{s1} = 10,05 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 14,07 \text{ cm}^2$

G&P intech srl

Via Retrone, 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)

Tel. 0444/522797 – Fax 0444/348692

C. F. e Partita IVA 03580250243 - Numero REA VI-0336685 - Capitale sociale € 100.000 i.v.

E-mail: info@gpintech.com - Sito internet: www.gpintech.com

Marchi registrati: Dual Seal® - FRP System® - Steel Net® - Armophalt® - Matarayl® - Superstop® - Concrete Rock® - Floor System® - GP Sunzenit® - Kryton® - Damp Stop® - Cemesan®

Su pilastro 78:

Trave 77-78 : Sezione 30x50 cm - Armatura $A_{s1} = 10,05 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 14,07 \text{ cm}^2$

Trave 72-78 : Sezione 30x35 cm - Armatura $A_{s1} = 8,04 \text{ cm}^2$ $A_{s2} = 8,04 \text{ cm}^2$

Le NTC2018 al paragrafo 7.4.4.3.1 asseriscono che il nodo deve essere progettato in maniera tale da evitare una sua rottura anticipata rispetto alle zone delle travi e dei pilastri in esso concorrenti. Pertanto le zone non dissipative devono essere progettate in funzione delle massime caratteristiche della sollecitazione interna che le zone dissipative sono in grado di trasmettere in condizioni ultime.

Nel caso specifico, le zone dissipative sono rappresentate dalle estremità delle travi che si plasticizzano per flessione mentre la zona non dissipativa è rappresentata dal nodo.

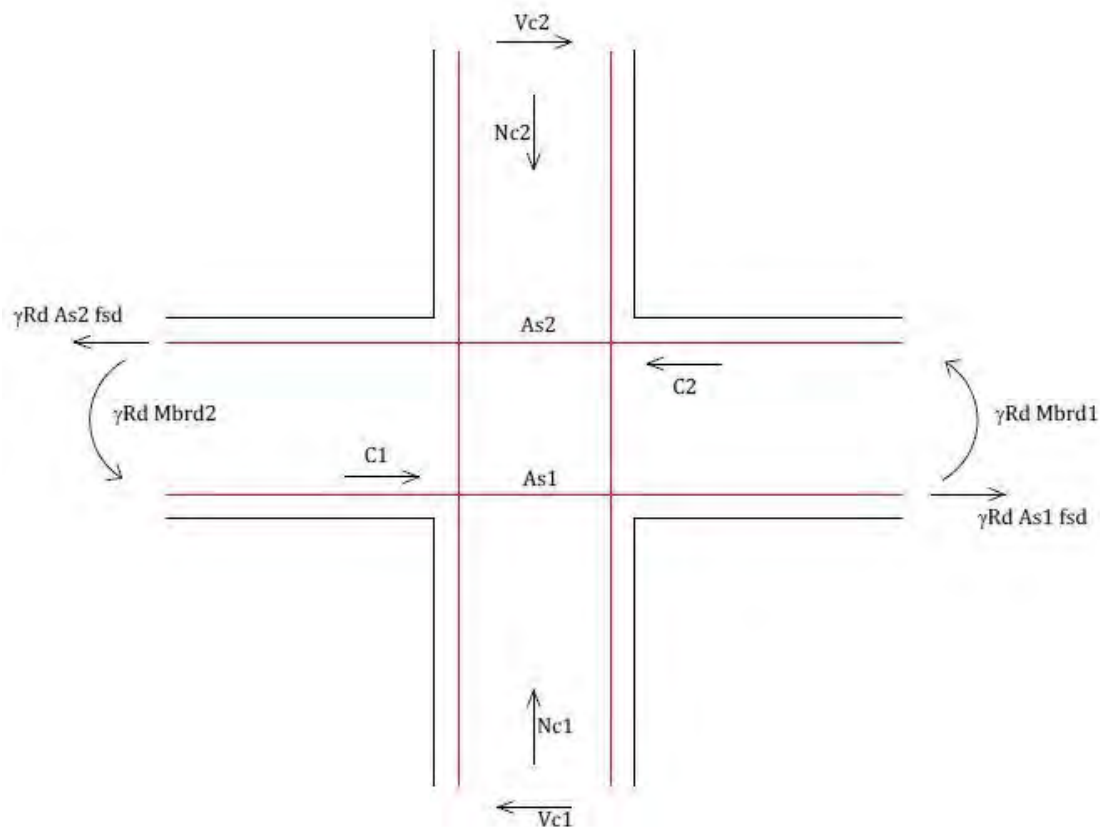


Figura 1: Nodo

La domanda a taglio agente nel nucleo di calcestruzzo del nodo può essere calcolata, come:

$$V_{jbd} = \gamma_{Rd} * (A_{s1} + A_{s2}) * f_{yd} - V_C \quad \text{per nodi interni}$$

G&P intech srl

Via Retrone, 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)

Tel. 0444/522797 – Fax 0444/348692

C. F. e Partita IVA 03580250243 - Numero REA VI-0336685 - Capitale sociale € 100.000 i.v.

E-mail: info@gpintech.com - Sito internet: www.gpintech.com

Marchi registrati: Dual Seal® - FRP System® - Steel Net® - Armophalt® - Mataryl® - Superstop® - Concrete Rock® - Floor System® - GP Sunzenit® - Kryton® - Damp Stop® - Cemesan®

L'espressione rappresenta il taglio sollecitante nel nodo e le forze di taglio che agiscono sui nodi devono corrispondere alla più avversa direzione di provenienza dell'azione sismica, la quale si riflette sulla scelta dei valori di A_{s1} , A_{s2} e V_c . Pertanto per il calcolo del taglio sollecitante è stata considerata la direzione rappresentata nella figura sottostante.

Per la verifica bisogna innanzitutto definire una sezione resistente per il nodo, ovvero b_j che rappresenta la larghezza della sezione resistente e h_{jc} l'altezza della sezione. La capacità a taglio del nodo è fornita da un meccanismo a traliccio che, a seguito della fessurazione diagonale, vede operare contemporaneamente un meccanismo di taglio compressione ed un meccanismo di taglio trazione. Si devono pertanto soddisfare requisiti atti a garantire l'efficacia dei due meccanismi.

La trazione nel puntone non deve eccedere la resistenza a trazione del cls, f_{ctd} . In particolare:

$$V_{j,Rd1} = b_j * h_{jc} * f_{ctd} * \sqrt{1 + \frac{v * f_{cd}}{f_{ctd}}}$$

$$v = \frac{\sigma_v}{f_{cd}}$$

La compressione nel puntone diagonale non deve eccedere la resistenza a compressione del calcestruzzo. In particolare:

$$V_{jbd} \leq V_{j,Rd2}$$

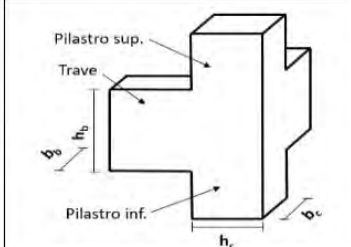
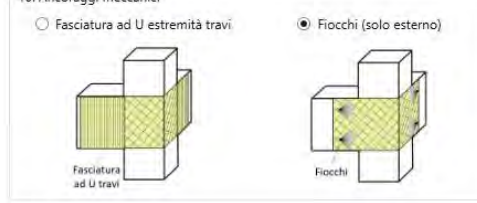
$$V_{j,Rd2} = b_j * h_{jc} * \eta * f_{cd} * \sqrt{1 - \frac{v}{\eta}}$$

$$\eta = \alpha * \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$$

- Se $V_{jbd} < V_{j,Rd1}$ non è necessario progettare un'armatura per la zona nodale e la verifica è soddisfatta;
- Se $V_{j,Rd1} < V_{jbd} < V_{j,Rd2}$ la verifica è soddisfatta ma la tensione principale di trazione supera la f_{ctd} e pertanto è necessario progettare una specifica armatura per la zona nodale;
- Se $V_{jbd} > V_{j,Rd2}$ la verifica del nodo non è soddisfatta e pertanto è necessario progettare nuovamente l'intero nodo e quindi rivedere la geometria degli elementi strutturali.

Di seguito verifica di calcolo per quanto riguarda:

PILASTRO/TRAVE N.1 – PIANO TERRA

1. Approccio progettuale ☒ Rinforzo locale (S8.4.1, NTC 2018) ☐ Basato su valori scelti delle sollecitazioni			10. Ancoraggi meccanici ☐ Fasciatura ad U estremità travi ☒ Fiochi (solo esterno)																																																										
2. Tipologia nodo ☒ Nodo d'angolo ☐ Nodo parete																																																													
3. Geometria <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Pilastro sup.</th> <th>Pilastro inf.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>h_c (mm)</td> <td>300</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>b_c (mm)</td> <td>500</td> <td>500</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Trave</td> </tr> <tr> <td>h_b (mm)</td> <td>300</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>b_b (mm)</td> <td>250</td> <td>1200</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Trave destra</td> </tr> <tr> <td>luce campata (mm)</td> <td>2950</td> <td>2600</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Sinistra</td> </tr> <tr> <td>altezza interpiano (mm)</td> <td>3900</td> <td>3300</td> </tr> </tbody> </table>				Pilastro sup.	Pilastro inf.	h_c (mm)	300	300	b_c (mm)	500	500	Trave			h_b (mm)	300	250	b_b (mm)	250	1200	Trave destra			luce campata (mm)	2950	2600	Sinistra			altezza interpiano (mm)	3900	3300	11. Progetto fiochi <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Trave</th> <th>Pilastro</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Φ fiocco (mm)</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Linghisaggio (mm)</td> <td>200</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td>Lsfiocco (mm)</td> <td>200</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td>α fiocco (°)</td> <td>90</td> <td>90</td> </tr> <tr> <td>Φ foro (mm)</td> <td>14</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>Vresina (MPa)</td> <td>130000</td> <td>130000</td> </tr> <tr> <td>f_{fu} (MPa)</td> <td>5300</td> <td>5300</td> </tr> <tr> <td>Vfibre (%)</td> <td>70</td> <td>70</td> </tr> </tbody> </table>			Trave	Pilastro	Φ fiocco (mm)	10	10	Linghisaggio (mm)	200	200	Lsfiocco (mm)	200	200	α fiocco (°)	90	90	Φ foro (mm)	14	14	Vresina (MPa)	130000	130000	f_{fu} (MPa)	5300	5300	Vfibre (%)	70	70
	Pilastro sup.		Pilastro inf.																																																										
h_c (mm)	300	300																																																											
b_c (mm)	500	500																																																											
Trave																																																													
h_b (mm)	300	250																																																											
b_b (mm)	250	1200																																																											
Trave destra																																																													
luce campata (mm)	2950	2600																																																											
Sinistra																																																													
altezza interpiano (mm)	3900	3300																																																											
	Trave	Pilastro																																																											
Φ fiocco (mm)	10	10																																																											
Linghisaggio (mm)	200	200																																																											
Lsfiocco (mm)	200	200																																																											
α fiocco (°)	90	90																																																											
Φ foro (mm)	14	14																																																											
Vresina (MPa)	130000	130000																																																											
f_{fu} (MPa)	5300	5300																																																											
Vfibre (%)	70	70																																																											
4. Dettagli armatura (se disponibili) <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Pilastro sup. d_i (mm)</th> <th>Pilastro inf. d_i (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A_{s1} (mm²)</td> <td>4</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>A_{s2} (mm²)</td> <td>4</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>A_{s3} (mm²)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="3">Trave</td> </tr> <tr> <td>A_{s1} (mm²)</td> <td>603</td> <td>1050</td> </tr> <tr> <td>A_{s2} (mm²)</td> <td>603</td> <td>1050</td> </tr> <tr> <td>copriferro (mm)</td> <td>30</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Pilastro sup. d_i (mm)	Pilastro inf. d_i (mm)	A_{s1} (mm ²)	4	14	A_{s2} (mm ²)	4	14	A_{s3} (mm ²)			Trave			A_{s1} (mm ²)	603	1050	A_{s2} (mm ²)	603	1050	copriferro (mm)	30		7. Verifica di resistenza a trazione (Circolare 2019) $0.3\sqrt{f_{cd}} \text{ (MPa)} \geq \sigma_t \text{ (MPa)}$ Capacità 1.11 < 1.14 Domanda max Esito Crisi a taglio trazione del nodo																																			
	Pilastro sup. d_i (mm)	Pilastro inf. d_i (mm)																																																											
A_{s1} (mm ²)	4	14																																																											
A_{s2} (mm ²)	4	14																																																											
A_{s3} (mm ²)																																																													
Trave																																																													
A_{s1} (mm ²)	603	1050																																																											
A_{s2} (mm ²)	603	1050																																																											
copriferro (mm)	30																																																												
5. Proprietà dei materiali <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Calcestruzzo</th> <th>Acciaio</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>f_{cm} (MPa)</td> <td>25</td> <td>f_{ym} (MPa) 375</td> </tr> <tr> <td>F.C.</td> <td>1.35</td> <td></td> </tr> <tr> <td>γ_c (fragili)</td> <td>1.35</td> <td>γ_{sd} 1.15</td> </tr> </tbody> </table>		Calcestruzzo		Acciaio	f_{cm} (MPa)	25	f_{ym} (MPa) 375	F.C.	1.35		γ_c (fragili)	1.35	γ_{sd} 1.15	8. Progetto rinforzo FRP Tipologia tessuto: Quadriassiale (0°, ±45°, ...) ☒ Nodo pre-danneggiato <table border="1"> <tbody> <tr> <td>t_r (mm)</td> <td>10</td> <td>$\sigma_{t,FRP}$ (MPa)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>E_r (MPa)</td> <td>260</td> <td>β_1 (°)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ε_{rk}</td> <td>1.7</td> <td>β_2 (mm)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>η_a</td> <td>0.95</td> <td>β_3 (°)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>γ_r</td> <td>1.2</td> <td>β_4 (mm)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>n_s</td> <td>1</td> <td>β_5 (°)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>n_l</td> <td>1</td> <td>β_6 (mm)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>σ_{td}</td> <td>0.0154</td> <td>β_7 (°)</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		t_r (mm)	10	$\sigma_{t,FRP}$ (MPa)		E_r (MPa)	260	β_1 (°)		ε_{rk}	1.7	β_2 (mm)		η_a	0.95	β_3 (°)		γ_r	1.2	β_4 (mm)		n_s	1	β_5 (°)		n_l	1	β_6 (mm)		σ_{td}	0.0154	β_7 (°)															
Calcestruzzo		Acciaio																																																											
f_{cm} (MPa)	25	f_{ym} (MPa) 375																																																											
F.C.	1.35																																																												
γ_c (fragili)	1.35	γ_{sd} 1.15																																																											
t_r (mm)	10	$\sigma_{t,FRP}$ (MPa)																																																											
E_r (MPa)	260	β_1 (°)																																																											
ε_{rk}	1.7	β_2 (mm)																																																											
η_a	0.95	β_3 (°)																																																											
γ_r	1.2	β_4 (mm)																																																											
n_s	1	β_5 (°)																																																											
n_l	1	β_6 (mm)																																																											
σ_{td}	0.0154	β_7 (°)																																																											
6. Sollecitazioni <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Pilastro sup.</th> <th>Pilastro inf.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N_{Ed} (kN)</td> <td>216</td> <td>118</td> </tr> <tr> <td>V_{Ed} (kN)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="3">Trave</td> </tr> <tr> <td>M_{Ed} (kNm)</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Pilastro sup.	Pilastro inf.	N_{Ed} (kN)	216	118	V_{Ed} (kN)			Trave			M_{Ed} (kNm)			9. Verifica di resistenza nodo rinforzato $0.3\sqrt{f_{cd}} + \sigma_{t,FRP} \text{ (MPa)} \geq \sigma_t \text{ (MPa)}$ Capacità resistente 1.28 $\geq$ 1.13 Domanda max Incremento di capacità resistente nodo 14% Esito Snervamento pilastro Verifica soddisfatta																																												
	Pilastro sup.	Pilastro inf.																																																											
N_{Ed} (kN)	216	118																																																											
V_{Ed} (kN)																																																													
Trave																																																													
M_{Ed} (kNm)																																																													
12. Interazione Tamponatura ☒ Nessuna interazione ☐ Rinforzo per spinta tamponatura		13. Tamponatura <table border="1"> <tbody> <tr> <td>β_1 (MPa)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>β_2 (MPa)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>luce netta campata (mm)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>altezza netta interpiano (mm)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>spessore tamponatura (mm)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>γ_c</td> <td></td> </tr> <tr> <td>f_{cd} (MPa)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>β (mm)</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> 		β_1 (MPa)		β_2 (MPa)		luce netta campata (mm)		altezza netta interpiano (mm)		spessore tamponatura (mm)		γ_c		f_{cd} (MPa)		β (mm)																																											
β_1 (MPa)																																																													
β_2 (MPa)																																																													
luce netta campata (mm)																																																													
altezza netta interpiano (mm)																																																													
spessore tamponatura (mm)																																																													
γ_c																																																													
f_{cd} (MPa)																																																													
β (mm)																																																													

Fa riferimento al nodo d'angolo del Piano terra. Per questo intervento è prevista una fasciatura esterna con tessuto quadriassiale tipo C-SHEET 240/380 127 Q, disposti sopra il nodo e che vanno ad estendersi su travi e pilastri per 1 m. Connettori a fiocco tipo CFIX 10 e resina epossidica per Inghisaggio tipo RESIN 75.

PILASTRO/TRAVE N.7 – PIANO TERRA

1. Approccio progettuale
☒ Rinforzo locale (S8.4.1, NTC 2018)
☐ Basato su valori scelti delle sollecitazioni

2. Tipologia nodo
☐ Nodo d'angolo
☒ Nodo parete

3. Geometria

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
h_c (mm)	300	300
b_c (mm)	500	500

	Trave sinistra	Trave destra
h_b (mm)	250	250
b_b (mm)	1200	1200

	Sinistra	Destra
luce campata (mm)	3600	2600
altezza interpiano (mm)	3900	3300

4. Dettagli armatura (se disponibili)

	Pilastro sup. d_i (mm)	Pilastro inf. d_i (mm)
A_{s1} (mm ²)	4	14
A_{s2} (mm ²)	4	14
A_{s3} (mm ²)		

	Trave sinistra	Trave destra
A_{s1} (mm ²)	1206	1050
A_{s2} (mm ²)	1206	1050
copriferro (mm)	30	

5. Proprietà dei materiali

Calcestruzzo		Acciaio	
f_{cm} (MPa)	25	f_{yk} (MPa)	375
F.C.	1,35		
γ_c (fragili)	1,35	γ_{rd}	1,15

6. Sollecitazioni

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
N_{Ed} (kN)	238	238
V_{Ed} (kN)		
M_{Ed} (kNm)		

7. Verifica di resistenza a trazione (Circolare 2019)
 $0.3\sqrt{f_{cd}} \text{ (MPa)} \geq \sigma_{jt} \text{ (MPa)}$
 Capacità **1,11** < **1,33** Domanda max
 Esito **Crisi a taglio trazione del nodo**

8. Progetto rinforzo FRP
 Tipologia tessuto: **Quadriassiale (0°, ±45°, 90°)**
☒ Nodo pre-danneggiato

	tr (mm)	ϵ_{fr} (%)	η_a	η_s	η_l	ϵ_{fa}
E_r (MPa)	260	1,7	0,95	2	3	0,0057
γ_{fr}	1,2					

9. Verifica di resistenza nodo rinforzato
 $0.3\sqrt{f_{cd}} + \sigma_{jt,FRP} \text{ (MPa)} \geq \sigma_{jt} \text{ (MPa)}$
 Capacità resistente **1,4** $\geq$ **1,32** Domanda max
 Incremento di capacità resistente nodo **25%**
 Esito **Snervamento pilastro**
Verifica soddisfatta

10. Ancoraggi meccanici
☐ Fasciatura ad U estremità travi
☒ Fiochetti (solo esterno)

11. Progetto fiochetti

	Trave	Pilastro
Φ_{fiocco} (mm)	10	10
$L_{inghisaggio}$ (mm)	200	200
$L_{sfiocco}$ (mm)	200	200
$\alpha_{sfiocco}$ (°)	90	90
Φ_{foro} (mm)	14	14
V_{resina} (MPa)	130000	130000
f_{fu} (MPa)	5300	5300
V_{fibre} (%)	70	70

N° ancoraggi su ogni trave: **4**
 N° ancoraggi su ogni pilastro: **2**
☐ Falso flush anchorage system

12. Interazione Tamponatura
☒ Nessuna interazione
☐ Rinforzo per spinta tamponatura

13. Tamponatura

$A_{t,FRP}$	
$A_{t,FRP}$	
Luogo terra con griglia (mm)	
Altezza netta interpiano (mm)	
Spessore di tamponatura (mm)	
γ_{fr}	
γ_{fr}	
γ_{fr}	

Fa riferimento al nodo d'angolo del Piano terra. Per questo intervento è prevista una fasciatura esterna con tessuto quadriassiale tipo C-SHEET 240/380 127 Q, disposti sopra il nodo e che vanno ad estendersi su travi e pilastri per 1 m. Connettori a fiocco tipo CFIX 10 e resina epossidica per Inghisaggio tipo RESIN 75.

PILASTRO/TRAVE N.10 – PIANO TERRA

1. Approccio progettuale

☒ Rinforzo locale (S8.4.1, NTC 2018)

☐ Basato su valori scelti delle sollecitazioni

2. Tipologia nodo

☐ Nodo d'angolo

☒ Nodo parete

3. Geometria

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
h_c (mm)	300	300
b_c (mm)	500	500
	Trave sinistra	Trave destra
h_b (mm)	250	250
b_b (mm)	1200	1200
luce campata (mm)	6300	2600
	Superiore	Inferiore
altezza interpiano (mm)	3900	3300

4. Dettagli armatura (se disponibili)

	Pilastro sup. d_j (mm)	Pilastro inf. d_j (mm)
A_{s1} (mm ²)	4	14
A_{s2} (mm ²)	4	14
A_{s3} (mm ²)		

	Trave sinistra	Trave destra
A_{s1} (mm ²)	2212	1206
A_{s2} (mm ²)	2212	1206
copriferro (mm)	30	

5. Proprietà dei materiali

Calcestruzzo		Acciaio	
f_{cm} (MPa)	25	f_{ym} (MPa)	375
F.C.	1,35		
γ_c (fragili)	1,35	γ_{rd}	1,15

6. Sollecitazioni

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
N_{Ed} (kN)	401	187
V_{Ed} (kN)		
M_{Ed} (kNm)		

7. Verifica di resistenza a trazione (Circolare 2019)

$0.3\sqrt{f_{cd}}$ (MPa) $\geq \sigma_t$ (MPa)

Capacità **1,11** < **1,48** Domanda max

Esito **Crisi a taglio trazione del nodo**

8. Progetto rinforzo FRP

Tipologia tessuto: **Quadriassiale (0°, ±45°)**

☒ Nodo pre-danneggiato

t_r (mm)	10
E_r (MPa)	260
ε_{Rk}	1,7
η_a	0,95
η_f	1,2
η_s	4
η_l	3
ε_{rd}	0,00376

9. Verifica di resistenza nodo rinforzato

$0.3\sqrt{f_{cd}} + \sigma_{t,FRP}$ (MPa) $\geq \sigma_t$ (MPa)

Capacità resistente **1,49** $\geq$ **1,47** Domanda max

Incremento di capacità resistente nodo **33%**

Esito **Snervamento pilastro**
Verifica soddisfatta

10. Ancoraggi meccanici

☐ Fasciatura ad U estremità travi

☒ Fiochetti (solo esterno)

11. Progetto fiochetti

	Trave	Pilastro
Φ_{fiocco} (mm)	10	10
Linghisaggio (mm)	200	200
L_{fiocco} (mm)	200	200
α_{fiocco} (°)	90	90
Φ_{foro} (mm)	14	14
V_{resina} (MPa)	130000	130000
f_{tu} (MPa)	5300	5300
V_{fibre} (%)	70	70

N° ancoraggi su ogni trave **5**

N° ancoraggi su ogni pilastro **3**

☐ Fiochetti multi-ancoraggio: **4**

12. Interazione Tamponatura

☒ Nessuna interazione

☐ Rinforzo per spinta tamponatura

13. Tamponatura

f_t (MPa)

f_{ct} (MPa)

Luce netta campata (mm)

Altezza netta d'interpiano (mm)

Spessore tamponatura (mm)

f_{td} (MPa)

γ_t (mm)

Verifica spinta d'acqua

Esito

Fa riferimento al nodo d'angolo del Piano terra. Per questo intervento è prevista una fasciatura in avvolgimento completo con tessuto quadriassiale tipo C-SHEET 240/380 127 Q. Disposizione di tessuto in carbonio tipo C-SHET 240/300 per aumentare la resistenza a taglio di travi e pilastro per 1 m. Connettori a fiocco tipo CFI 10 e resina epossidica per Inghisaggio tipo RESIN 75

PILASTRO/TRAVE N.2 – PIANO RIALZATO

1. Approccio progettuale

☒ Rinforzo locale (S8.4.1, NTC 2018)

☐ Basato su valori scelti delle sollecitazioni

2. Tipologia nodo

☐ Nodo d'angolo

☒ Nodo parete

3. Geometria

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
h_c (mm)	300	300
b_c (mm)	500	500

	Trave sinistra	Trave destra
h_b (mm)	350	350
b_b (mm)	300	300

	Sinistra	Destra
luce campata (mm)	6300	2400
altezza interpiano (mm)	3900	3300

4. Dettagli armatura (se disponibili)

	Pilastro sup. d_i (mm)	Pilastro inf. d_i (mm)
A_{s1} (mm ²)	4	4
A_{s2} (mm ²)	4	4
A_{s3} (mm ²)		

	Trave sinistra	Trave destra
A_{s1} (mm ²)	603	603
A_{s2} (mm ²)	603	603
copriferro (mm)	30	

5. Proprietà dei materiali

Calcestruzzo		Acciaio	
f_{cm} (MPa)	25	f_{ym} (MPa)	375
F.C.	1,35		
γ_c (fragili)	1,35	γ_{Rd}	1,15

6. Sollecitazioni

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
N_{Ed} (kN)	114	282
V_{Ed} (kN)		

	Trave sinistra	Trave destra
M_{Ed} (kNm)		
V_{Ed} (kN)		

7. Verifica di resistenza a trazione (Circolare 2019)

$0.3\sqrt{f_{cd}}$ (MPa) $\geq$ σ_t (MPa)

Capacità **1,11** < **1,21** Domanda max

Esito **Crisi a taglio trazione del nodo**

8. Progetto rinforzo FRP

Tipologia tessuto: Quadriassiale (0°, ±45°, v)

☒ Nodo pre-danneggiato

	0°	±45°
t_r (mm)	10	
E_r (MPa)	260	
ε_{rk}	1,7	
η_a	0,95	
γ_r	1,2	
n_s	1	
n_l	1	
σ_{td}	0,01435	

9. Verifica di resistenza nodo rinforzato

$0.3\sqrt{f_{cd}} + \sigma_{t,FRP}$ (MPa) $\geq$ σ_t (MPa)

Capacità resistente **1,3** $\geq$ **1,2** Domanda max

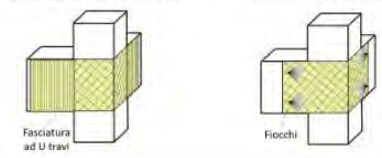
Incremento di capacità resistente nodo **16%**

Esito **Snervamento pilastro**
Verifica soddisfatta

10. Ancoraggi meccanici

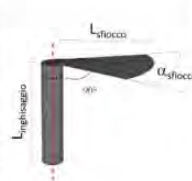
☐ Fasciatura ad U estremità travi

☒ Fiochi (solo esterno)



11. Progetto fiochi

	Trave	Pilastro
Φ_{fiocco} (mm)	10	10
Linghisaggio (mm)	200	200
L_{fiocco} (mm)	200	200
α_{fiocco} (°)	90	90
Φ_{foro} (mm)	14	14
V_{resina} (MPa)	130000	130000
f_{ru} (MPa)	5300	5300
V_{fibre} (%)	70	70
N° ancoraggi su ogni trave		3
N° ancoraggi su ogni pilastro		2
☐ Fiochi autoancoraggi trave		4



12. Interazione Tamponatura

☒ Nessuna interazione

☐ Rinforzo per spinta tamponatura

13. Tamponatura

	Trave	Pilastro
f_b (MPa)		
f_{bx} (MPa)		
Luogo: metà campata (mm)		
Mezzogiorno: mezzo (mm)		
Quartiere: tamponatura (mm)		
γ_r		
γ_{Rd} (MPa)		
t_r (mm)		



Fa riferimento al nodo intermedio del Piano Rialzato. Per questo intervento è prevista una fasciatura su superficie esterna con tessuto quadriassiale tipo C-SHEET 240/380 127 Q con estensione del tessuto sulle porzioni di travi e pilastri per 1 m. Connettori a fiocco tipo CFIX 10 e resina epossidica per Inghisaggio tipo RESIN 75.

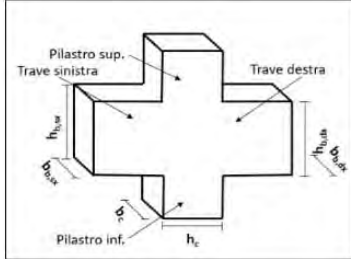
PILASTRO/TRAVE N.5 – PIANO RIALZATO

1. Approccio progettuale
☒ Rinforzo locale (S8.4.1, NTC 2018)
☐ Basato su valori scelti delle sollecitazioni

2. Tipologia nodo
☐ Nodo d'angolo
☒ Nodo parete

3. Geometria

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
h_c (mm)	300	300
b_c (mm)	500	500
h_b (mm)	350	350
b_b (mm)	500	500
luce campata (mm)	2950	6600
altezza interpiano (mm)	3900	3300



7. Verifica di resistenza a trazione (Circolare 2019)
 $0.3\sqrt{f_{cd}} \text{ (MPa)} \geq \sigma_{jt} \text{ (MPa)}$
Capacità **1.12** $\geq$ **0.79** Domanda max
Esito **Verifica soddisfatta**

4. Dettagli armatura (se disponibili)

	Pilastro sup. d_i (mm)	Pilastro inf. d_i (mm)
A_{s1} (mm ²)	4	4
A_{s2} (mm ²)	4	4
A_{s3} (mm ²)		

	Trave sinistra	Trave destra
A_{s1} (mm ²)	603	1005
A_{s2} (mm ²)	603	1005
copriferro (mm)	30	

8. Progetto rinforzo FRP

Tipologia tessuto: **Quadriassiale (0°, ±45°, ...)**

☒ Nodo pre-danneggiato

	tr (mm)	σ_{fr} (MPa)
E_f (MPa)	10	260
ϵ_{fk}	1.7	
η_a	0.95	
η_f	1.2	
η_s	1	
η_l	1	
ϵ_{fd}	0.01435	

5. Proprietà dei materiali

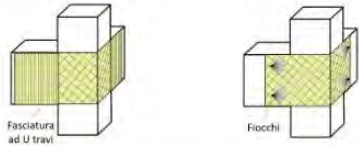
	Calcestruzzo	Acciaio
f_{cm} (MPa)	25	f_{ym} (MPa) 375
F.C.	1.35	
γ_c (fragili)	1.35	γ_{rd} 1.15

6. Sollecitazioni

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
N_{Ed} (kN)	208	161
V_{Ed} (kN)		
M_{Ed} (kNm)		

9. Verifica di resistenza nodo rinforzato
 $0.3\sqrt{f_{cd}} + \sigma_{FRP} \text{ (MPa)} \geq \sigma_{jt} \text{ (MPa)}$
Capacità resistente **1.3** $\geq$ **0.79** Domanda max
Incremento di capacità resistente nodo **16%**
Esito **Snervamento pilastro**
Verifica soddisfatta

10. Ancoraggi meccanici
☐ Fasciatura ad U estremità travi
☒ Fiochetti (solo esterno)



11. Progetto fiochetti

	Trave	Pilastro
Φ_{fiocco} (mm)	10	10
Linghiaggio (mm)	200	200
L_{fiocco} (mm)	200	200
α_{fiocco} (°)	90	90
Φ_{foro} (mm)	14	14
V_{resina} (MPa)	130000	130000
f_{fu} (MPa)	5300	5300
V_{fibre} (%)	70	70

N° ancoraggi su ogni trave: **3**
 N° ancoraggi su ogni pilastro: **2**

☐ Filati non ancoraggiati

12. Interazione Tamponatura
☒ Nessuna interazione
☐ Rinforzo per spinta tamponatura

In questo caso il nodo verrebbe verificato senza rinforzo con tessuto tuttavia se si vuole migliorare la resistenza del nodo con un miglioramento del 16% si può applicare del tessuto quadriassiale in fasciatura completa.

PILASTRO/TRAVE N.10 – PIANO RIALZATO

1. Approccio progettuale
☒ Rinforzo locale (S8.4.1, NTC 2018)
☐ Basato su valori scelti delle sollecitazioni

2. Tipologia nodo
☐ Nodo d'angolo
☒ Nodo parete

3. Geometria

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
h_c (mm)	300	300
b_c (mm)	500	500
	Trave sinistra	Trave destra
h_b (mm)	350	350
b_b (mm)	500	500
	Sinistra	Destra
luce campata (mm)	6600	6600
altezza interpiano (mm)	3900	3300

7. Verifica di resistenza a trazione (Circolare 2019)
 $0.3\sqrt{f_{cd}}$ (MPa) $\geq$ σ_T (MPa)
Capacità **1.11** < **1.18** Domanda max
Esito **Crisi a taglio trazione del nodo**

8. Progetto rinforzo FRP
Tipologia tessuto: Quadrassiale ($0^\circ, \pm 45^\circ$)
☒ Nodo pre-danneggiato

t_r (mm)	10
E_r (MPa)	260
ε_{rk}	1.7
η_a	0.95
γ_f	1.2
n_s	1
n_l	1
ε_{fd}	0.01435

4. Dettagli armatura (se disponibili)

	Pilastro sup. d_j (mm)	Pilastro inf. d_j (mm)
A_{s1} (mm ²)	4	14
A_{s2} (mm ²)	4	14
A_{s3} (mm ²)		
	Trave sinistra	Trave destra
A_{s1} (mm ²)	1005	1005
A_{s2} (mm ²)	1005	1005
copriferro (mm)	30	

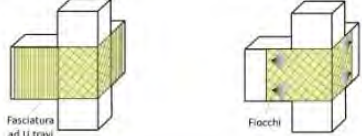
5. Proprietà dei materiali

Calcestruzzo		Acciaio	
f_{cm} (MPa)	25	f_{yk} (MPa)	375
F.C.	1.35		
γ_c (fragili)	1.35	γ_{Rd}	1.15

6. Sollecitazioni

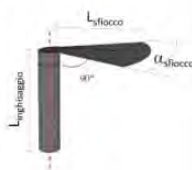
	Pilastro sup.	Pilastro inf.
N_{Ed} (kN)	274	246
V_{Ed} (kN)		
M_{Ed} (kNm)		

9. Verifica di resistenza nodo rinforzato
 $0.3\sqrt{f_{cd}} + \sigma_{T,FRP}$ (MPa) $\geq$ σ_T (MPa)
Capacità resistente **1.3** $\geq$ **1.17** Domanda max
Incremento di capacità resistente nodo **16%**
Esito **Snervamento pilastro**
Verifica soddisfatta

10. Ancoraggi meccanici
☐ Fasciatura ad U estremità travi
☒ Fioocchi (solo esterno)


11. Progetto fioocchi

	Trave	Pilastro
Φ_{fiooco} (mm)	10	10
Linghisaggio (mm)	200	200
$L_{sfiooco}$ (mm)	200	200
$\alpha_{sfiooco}$ (°)	90	90
Φ_{foro} (mm)	14	14
V_{resina} (MPa)	130000	130000
f_{fu} (MPa)	5300	5300
V_{fibre} (%)	70	70
N° ancoraggi su ogni trave		3
N° ancoraggi su ogni pilastro		2
☐ Fioocchi multi ancoraggi interni		



12. Interazione Tamponatura
☒ Nessuna interazione
☐ Rinforzo per spinta tamponatura

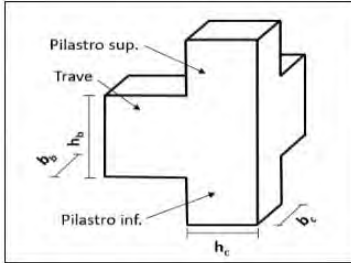
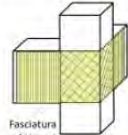
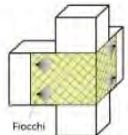
13. Esposizione

$f_{ct,90}$ (MPa)	
$f_{ct,180}$ (MPa)	
Luce porta campata (mm)	
Altezza porta interpiano (mm)	
Spessore parapetto (mm)	
γ_{FT}	
f_{td} (MPa)	
t_1 (mm)	



Fa riferimento al nodo intermedio del Piano Rialzato. Per questo intervento è prevista una fasciatura su superficie esterna con tessuto quadriassiale tipo C-SHEET 240/380 127 Q con estensione del tessuto sulle porzioni di travi e pilastri per 1 m. Connettori a fiocco tipo CFIX 10 e resina epossidica per Inghisaggio tipo RESIN 75.

PILASTRO/TRAVE N.49 – PIANO RIALZATO

1. Approccio progettuale ☒ Rinforzo locale (S8.4.1, NTC 2018) ☐ Basato su valori scelti delle sollecitazioni			10. Ancoraggi meccanici ☐ Fasciatura ad U estremità travi ☒ Fioocchi (solo esterno)																																																																		
2. Tipologia nodo ☒ Nodo d'angolo ☐ Nodo parete			 																																																																		
3. Geometria <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Pilastro sup.</th> <th>Pilastro inf.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>h_c (mm)</td> <td>300</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>b_c (mm)</td> <td>500</td> <td>500</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Trave</td> </tr> <tr> <td>h_b (mm)</td> <td>350</td> <td>350</td> </tr> <tr> <td>b_b (mm)</td> <td>500</td> <td>500</td> </tr> <tr> <td colspan="3">luce campata (mm)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>6700</td> <td>6600</td> </tr> <tr> <td colspan="3">altezza interpiano (mm)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>3900</td> <td>3300</td> </tr> </tbody> </table>				Pilastro sup.	Pilastro inf.	h_c (mm)	300	300	b_c (mm)	500	500	Trave			h_b (mm)	350	350	b_b (mm)	500	500	luce campata (mm)				6700	6600	altezza interpiano (mm)				3900	3300	11. Progetto fioocchi <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Trave</th> <th>Pilastro</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Φ fioocco (mm)</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Linghisaggio (mm)</td> <td>200</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td>L_{fioocco} (mm)</td> <td>200</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td>α fioocco (°)</td> <td>90</td> <td>90</td> </tr> <tr> <td>Φ foro (mm)</td> <td>14</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>V_{resina} (MPa)</td> <td>130000</td> <td>130000</td> </tr> <tr> <td>f_{tU} (MPa)</td> <td>5300</td> <td>5300</td> </tr> <tr> <td>V_{fibre} (%)</td> <td>70</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>N° ancoraggi su ogni trave</td> <td>3</td> <td></td> </tr> <tr> <td>N° ancoraggi su ogni pilastro</td> <td></td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>☐ Falso nome ancoraggi trave</td> <td>4</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Trave	Pilastro	Φ fioocco (mm)	10	10	Linghisaggio (mm)	200	200	L_{fioocco} (mm)	200	200	α fioocco (°)	90	90	Φ foro (mm)	14	14	V_{resina} (MPa)	130000	130000	f_{tU} (MPa)	5300	5300	V_{fibre} (%)	70	70	N° ancoraggi su ogni trave	3		N° ancoraggi su ogni pilastro		2	☐ Falso nome ancoraggi trave	4
	Pilastro sup.	Pilastro inf.																																																																			
h_c (mm)	300	300																																																																			
b_c (mm)	500	500																																																																			
Trave																																																																					
h_b (mm)	350	350																																																																			
b_b (mm)	500	500																																																																			
luce campata (mm)																																																																					
	6700	6600																																																																			
altezza interpiano (mm)																																																																					
	3900	3300																																																																			
	Trave	Pilastro																																																																			
Φ fioocco (mm)	10	10																																																																			
Linghisaggio (mm)	200	200																																																																			
L_{fioocco} (mm)	200	200																																																																			
α fioocco (°)	90	90																																																																			
Φ foro (mm)	14	14																																																																			
V_{resina} (MPa)	130000	130000																																																																			
f_{tU} (MPa)	5300	5300																																																																			
V_{fibre} (%)	70	70																																																																			
N° ancoraggi su ogni trave	3																																																																				
N° ancoraggi su ogni pilastro		2																																																																			
☐ Falso nome ancoraggi trave	4																																																																				
4. Dettagli armatura (se disponibili) <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Pilastro sup. di (mm)</th> <th>Pilastro inf. di (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A_{S1} (mm²)</td> <td>4</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>A_{S2} (mm²)</td> <td>4</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>A_{S3} (mm²)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="3">Trave</td> </tr> <tr> <td>A_{S1} (mm²)</td> <td>1005</td> <td>1005</td> </tr> <tr> <td>A_{S2} (mm²)</td> <td>1005</td> <td>1005</td> </tr> <tr> <td>copriferro (mm)</td> <td>30</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Pilastro sup. di (mm)	Pilastro inf. di (mm)	A_{S1} (mm²)	4	4	A_{S2} (mm²)	4	4	A_{S3} (mm²)			Trave			A_{S1} (mm²)	1005	1005	A_{S2} (mm²)	1005	1005	copriferro (mm)	30		7. Verifica di resistenza a trazione (Circolare 2019) $0.3\sqrt{f_{cd}} \text{ (MPa)} \geq \sigma_{tL} \text{ (MPa)}$ Capacità 1,12 $\geq$ 0,89 Domanda max Esito Verifica soddisfatta																																											
	Pilastro sup. di (mm)	Pilastro inf. di (mm)																																																																			
A_{S1} (mm²)	4	4																																																																			
A_{S2} (mm²)	4	4																																																																			
A_{S3} (mm²)																																																																					
Trave																																																																					
A_{S1} (mm²)	1005	1005																																																																			
A_{S2} (mm²)	1005	1005																																																																			
copriferro (mm)	30																																																																				
5. Proprietà dei materiali <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Calcestruzzo</th> <th colspan="2">Acciaio</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>f_{cm} (MPa)</td> <td>25</td> <td>f_{ym} (MPa)</td> <td>375</td> </tr> <tr> <td>F.C.</td> <td>1,35</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>γ_c (fragili)</td> <td>1,35</td> <td>γ_{Rd}</td> <td>1,15</td> </tr> </tbody> </table>		Calcestruzzo		Acciaio		f_{cm} (MPa)	25	f_{ym} (MPa)	375	F.C.	1,35			γ_c (fragili)	1,35	γ_{Rd}	1,15	8. Progetto rinforzo FRP Tipologia tessuto: Quadriassiale (0°, ±45°, ...) ☒ Nodo pre-danneggiato <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>tr (mm)</th> <th>f_{tL} (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>t_r (mm)</td> <td>10</td> <td></td> </tr> <tr> <td>E_r (MPa)</td> <td>260</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ϵ_{rk}</td> <td>1,7</td> <td></td> </tr> <tr> <td>η_a</td> <td>0,95</td> <td></td> </tr> <tr> <td>η_r</td> <td>1,2</td> <td></td> </tr> <tr> <td>η_s</td> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>η_l</td> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ϵ_{td}</td> <td>0,01435</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			tr (mm)	f_{tL} (MPa)	t_r (mm)	10		E_r (MPa)	260		ϵ_{rk}	1,7		η_a	0,95		η_r	1,2		η_s	1		η_l	1		ϵ_{td}	0,01435																								
Calcestruzzo		Acciaio																																																																			
f_{cm} (MPa)	25	f_{ym} (MPa)	375																																																																		
F.C.	1,35																																																																				
γ_c (fragili)	1,35	γ_{Rd}	1,15																																																																		
	tr (mm)	f_{tL} (MPa)																																																																			
t_r (mm)	10																																																																				
E_r (MPa)	260																																																																				
ϵ_{rk}	1,7																																																																				
η_a	0,95																																																																				
η_r	1,2																																																																				
η_s	1																																																																				
η_l	1																																																																				
ϵ_{td}	0,01435																																																																				
6. Sollecitazioni <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Pilastro sup.</th> <th>Pilastro inf.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N_{Ed} (kN)</td> <td>159</td> <td>159</td> </tr> <tr> <td>V_{Ed} (kN)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="3">Trave</td> </tr> <tr> <td>M_{Ed} (kNm)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="3">Trave destra</td> </tr> <tr> <td>M_{Ed} (kNm)</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Pilastro sup.	Pilastro inf.	N_{Ed} (kN)	159	159	V_{Ed} (kN)			Trave			M_{Ed} (kNm)			Trave destra			M_{Ed} (kNm)			9. Verifica di resistenza nodo rinforzato $0.3\sqrt{f_{cd}} + \sigma_{tL,FRP} \text{ (MPa)} \geq \sigma_{tL} \text{ (MPa)}$ Capacità resistente 1,3 $\geq$ 0,89 Domanda max Incremento di capacità resistente nodo 16% Esito Snervamento pilastro Verifica soddisfatta																																														
	Pilastro sup.	Pilastro inf.																																																																			
N_{Ed} (kN)	159	159																																																																			
V_{Ed} (kN)																																																																					
Trave																																																																					
M_{Ed} (kNm)																																																																					
Trave destra																																																																					
M_{Ed} (kNm)																																																																					
		12. Interazione Tamponatura ☒ Nessuna interazione ☐ Rinforzo per spinta tamponatura																																																																			
		13. Tamponatura <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>f_t (MPa)</th> <th>f_{tR} (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>f_t (MPa)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>f_{tR} (MPa)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>luce nista (mm)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>altezza nista (mm)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>spessore tamponatura (mm)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>V_{tR} (kN)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>f_{tR} (MPa)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>t (mm)</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			f_t (MPa)	f_{tR} (MPa)	f_t (MPa)			f_{tR} (MPa)			luce nista (mm)			altezza nista (mm)			spessore tamponatura (mm)			V_{tR} (kN)			f_{tR} (MPa)			t (mm)																																									
	f_t (MPa)	f_{tR} (MPa)																																																																			
f_t (MPa)																																																																					
f_{tR} (MPa)																																																																					
luce nista (mm)																																																																					
altezza nista (mm)																																																																					
spessore tamponatura (mm)																																																																					
V_{tR} (kN)																																																																					
f_{tR} (MPa)																																																																					
t (mm)																																																																					

Fa riferimento al nodo d'angolo del Piano Rialzato. Per questo intervento è prevista una fasciatura su superficie esterna con tessuto quadriassiale tipo C-SHEET 240/380 127 Q con estensione del tessuto sulle porzioni di travi e pilastri per 1 m. Connettori a fiocco tipo CFIX 10 e resina epossidica per Inghisaggio tipo RESIN 75.

PILASTRO/TRAVE N.50 – PIANO RIALZATO

1. Approccio progettuale
☒ Rinforzo locale (S8.4.1, NTC 2018)
☐ Basato su valori scelti delle sollecitazioni

2. Tipologia nodo
☐ Nodo d'angolo
☒ Nodo parete

3. Geometria

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
h_c (mm)	300	300
b_c (mm)	500	500
	Trave sinistra	Trave destra
h_b (mm)	350	350
b_b (mm)	500	500
	Sinistra	Destra
luce campata (mm)	6700	6600
altezza interpiano (mm)	3900	3300

4. Dettagli armatura (se disponibili)

	Pilastro sup. d_i (mm)	Pilastro inf. d_i (mm)
A_{s1} (mm ²)	4	14
A_{s2} (mm ²)	4	14
A_{s3} (mm ²)		

	Trave sinistra	Trave destra
A_{s1} (mm ²)	1005	1005
A_{s2} (mm ²)	1005	1005
copriferro (mm)	30	

5. Proprietà dei materiali

Calcestruzzo		Acciaio	
f_{cm} (MPa)	25	f_{ym} (MPa)	375
F.C.	1.35		
γ_c (fragili)	1.35	γ_{Rd}	1.15

6. Sollecitazioni

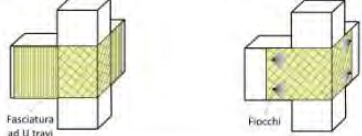
	Pilastro sup.	Pilastro inf.
N_{Ed} (kN)	263	278
V_{Ed} (kN)		
M_{Ed} (kNm)		

7. Verifica di resistenza a trazione (Circolare 2019)
 $0.3\sqrt{f_{cd}}$ (MPa) $\geq$ σ_T (MPa)
Capacità **1.11** < **1.27** Domanda max
Esito **Crisi a taglio trazione del nodo**

8. Progetto rinforzo FRP
Tipologia tessuto: Quadrassiale (0°, ±45°)
☒ Nodo pre-danneggiato

t_r (mm)	10	$\sigma_{T,FRP}$ (MPa)	
E_r (MPa)	260	$\epsilon_{T,FRP}$ (%)	
ϵ_{Rk}	1.7	$\epsilon_{T,FRP}$ (%)	
η_a	0.95	$\epsilon_{T,FRP}$ (%)	
γ_f	1.2	$\epsilon_{T,FRP}$ (%)	
n_s	1	$\epsilon_{T,FRP}$ (%)	
n_l	1	$\epsilon_{T,FRP}$ (%)	
ϵ_{Rd}	0.01435	$\epsilon_{T,FRP}$ (%)	

9. Verifica di resistenza nodo rinforzato
 $0.3\sqrt{f_{cd}} + \sigma_{T,FRP}$ (MPa) $\geq$ σ_T (MPa)
Capacità resistente **1.3** $\geq$ **1.26** Domanda max
Incremento di capacità resistente nodo **16%**
Esito **Snervamento pilastro**
Verifica soddisfatta

10. Ancoraggi meccanici
☐ Fasciatura ad U estremità travi
☒ Fiochi (solo esterno)


11. Progetto fiochi

	Trave	Pilastro
Φ_{fiocco} (mm)	10	10
Linghisaggio (mm)	200	200
$L_{sfiocco}$ (mm)	200	200
$\alpha_{sfiocco}$ (°)	90	90
Φ_{foro} (mm)	14	14
V_{resina} (MPa)	130000	130000
f_{tu} (MPa)	5300	5300
V_{fibre} (%)	70	70
N° ancoraggi su ogni trave		3
N° ancoraggi su ogni pilastro		2
☐ Fiochi multi ancoraggi (max 4)		



12. Interazione Tamponatura
☒ Nessuna interazione
☐ Rinforzo per spinta tamponatura

13. Tamponatura

$A_{t,tamponatura}$ (mm ²)	
$A_{t,tamponatura}$ (mm ²)	
Luogo (perla campata) (mm)	
Altezza netta interpiano (mm)	
Spessore di tamponatura (mm)	
γ_f (%)	
γ_{Rd} (%)	
γ_{Rd} (%)	



Fa riferimento al nodo intermedio del Piano Rialzato. Per questo intervento è prevista una fasciatura su superficie esterna con tessuto quadriassiale tipo C-SHEET 240/380 127 Q con estensione del tessuto sulle porzioni di travi e pilastri per 1 m. Connettori a fiocco tipo CFIX 10 e resina epossidica per Inghisaggio tipo RESIN 75.

PILASTRO/TRAVE N.51 – PIANO RIALZATO

1. Approccio progettuale

☒ Rinforzo locale (S8.4.1, NTC 2018)

☐ Basato su valori scelti delle sollecitazioni

2. Tipologia nodo

☐ Nodo d'angolo

☒ Nodo parete

3. Geometria

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
h_c (mm)	300	300
b_c (mm)	500	500

	Trave sinistra	Trave destra
h_b (mm)	350	350
b_b (mm)	500	500
luce campata (mm)	6700	6600
altezza interpiano (mm)	3900	3300

4. Dettagli armatura (se disponibili)

	Pilastro sup. d_i (mm)	Pilastro inf. d_i (mm)
A_{s1} (mm ²)	4	14
A_{s2} (mm ²)	4	14
A_{s3} (mm ²)		

	Trave sinistra	Trave destra
A_{s1} (mm ²)	1005	1005
A_{s2} (mm ²)	1005	1005
copriferro (mm)	30	

5. Proprietà dei materiali

	Calcestruzzo	Acciaio
f_{cm} (MPa)	25	f_{ym} (MPa) 375
F.C.	1,35	
γ_c (fragili)	1,35	γ_{rd} 1,15

6. Sollecitazioni

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
N_{Ed} (kN)	255	246

7. Verifica di resistenza a trazione (Circolare 2019)

$0.3 \sqrt{f_{cd}}$ (MPa) $\geq \sigma_t$ (MPa)

Capacità **1,11** < **1,16** Domanda max

Esito **Crisi a taglio trazione del nodo**

8. Progetto rinforzo FRP

Tipologia tessuto: **Quadriassiale (0°, ±45°)**

☒ Nodo pre-danneggiato

	Valore	Unità
t_r (mm)	10	
E_f (MPa)	260	
ε_{fk}	1,7	
η_a	0,95	
η_f	1,2	
η_s	1	
η_l	1	
ε_{td}	0,01435	

9. Verifica di resistenza nodo rinforzato

$0.3 \sqrt{f_{cd}} + \sigma_{t,FRP}$ (MPa) $\geq \sigma_t$ (MPa)

Capacità resistente **1,3** $\geq$ **1,15** Domanda max

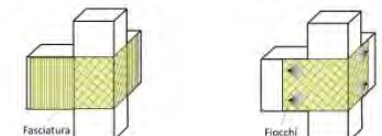
Incremento di capacità resistente nodo **16%**

Esito **Snervamento pilastro**
Verifica soddisfatta

10. Ancoraggi meccanici

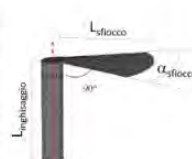
☐ Fasciatura ad U estremità travi

☒ Fiochetti (solo esterno)



11. Progetto fiochetti

	Trave	Pilastro
Φ_{fiocco} (mm)	10	10
Linghisaggio (mm)	200	200
L_{fiocco} (mm)	200	200
α_{fiocco} (°)	90	90
Φ_{foro} (mm)	14	14
V_{resina} (MPa)	130000	130000
f_{fu} (MPa)	5300	5300
V_{fibre} (%)	70	70
N° ancoraggi su ogni trave	3	
N° ancoraggi su ogni pilastro	2	



12. Interazione Tamponatura

☒ Nessuna interazione

☐ Rinforzo per spinta tamponatura

13. Tamponatura

$f_{ct,FRP}$ (MPa)

$f_{ct,FRP}$ (MPa)

Lunghezza campata (mm)

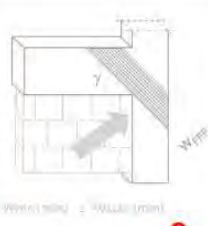
Altezza vista interpilastro (mm)

Spessore tamponatura (mm)

γ_{FRP}

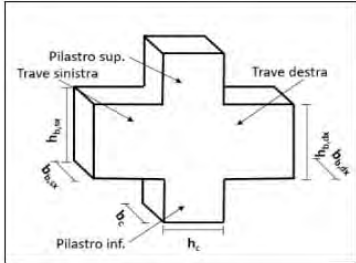
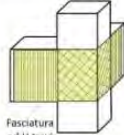
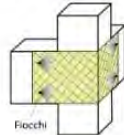
$f_{ct,FRP}$ (MPa)

$f_{ct,FRP}$ (MPa)



Fa riferimento al nodo intermedio del Piano Rialzato. Per questo intervento è prevista una fasciatura su superficie esterna con tessuto quadriassiale tipo C-SHEET 240/380 127 Q con estensione del tessuto sulle porzioni di travi e pilastri per 1 m. Connettori a fiocco tipo CFIX 10 e resina epossidica per Inghisaggio tipo RESIN 75.

PILASTRO/TRAVE N.52 – PIANO RIALZATO

1. Approccio progettuale ☒ Rinforzo locale (S8.4.1, NTC 2018) ☐ Basato su valori scelti delle sollecitazioni			10. Ancoraggi meccanici ☐ Fasciatura ad U estremità travi ☒ Focchi (solo esterno)																																																							
2. Tipologia nodo ☐ Nodo d'angolo ☒ Nodo parete			 																																																							
3. Geometria <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Pilastro sup.</th> <th>Pilastro inf.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>h_c (mm)</td> <td>300</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>b_c (mm)</td> <td>500</td> <td>500</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Trave sinistra</th> <th>Trave destra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>h_b (mm)</td> <td>350</td> <td>350</td> </tr> <tr> <td>b_b (mm)</td> <td>500</td> <td>500</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Sinistra</th> <th>Destra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>luce campata (mm)</td> <td>6700</td> <td>5050</td> </tr> <tr> <td>altezza interpiano (mm)</td> <td>3900</td> <td>3300</td> </tr> </tbody> </table>				Pilastro sup.	Pilastro inf.	h_c (mm)	300	300	b_c (mm)	500	500		Trave sinistra	Trave destra	h_b (mm)	350	350	b_b (mm)	500	500		Sinistra	Destra	luce campata (mm)	6700	5050	altezza interpiano (mm)	3900	3300	11. Progetto focchi <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Trave</th> <th>Pilastro</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Φ fiocco (mm)</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Linghisaggio (mm)</td> <td>200</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td>L_{sfoc} (mm)</td> <td>200</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td>α_{sfoc} (°)</td> <td>90</td> <td>90</td> </tr> <tr> <td>Φ foro (mm)</td> <td>14</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>V_{resina} (MPa)</td> <td>130000</td> <td>130000</td> </tr> <tr> <td>f_{fu} (MPa)</td> <td>5300</td> <td>5300</td> </tr> <tr> <td>V_{fibre} (%)</td> <td>70</td> <td>70</td> </tr> </tbody> </table> N° ancoraggi su ogni trave: 3 N° ancoraggi su ogni pilastro: 2			Trave	Pilastro	Φ fiocco (mm)	10	10	Linghisaggio (mm)	200	200	L_{sfoc} (mm)	200	200	α_{sfoc} (°)	90	90	Φ foro (mm)	14	14	V_{resina} (MPa)	130000	130000	f_{fu} (MPa)	5300	5300	V_{fibre} (%)	70	70
	Pilastro sup.		Pilastro inf.																																																							
h_c (mm)	300	300																																																								
b_c (mm)	500	500																																																								
	Trave sinistra	Trave destra																																																								
h_b (mm)	350	350																																																								
b_b (mm)	500	500																																																								
	Sinistra	Destra																																																								
luce campata (mm)	6700	5050																																																								
altezza interpiano (mm)	3900	3300																																																								
	Trave	Pilastro																																																								
Φ fiocco (mm)	10	10																																																								
Linghisaggio (mm)	200	200																																																								
L_{sfoc} (mm)	200	200																																																								
α_{sfoc} (°)	90	90																																																								
Φ foro (mm)	14	14																																																								
V_{resina} (MPa)	130000	130000																																																								
f_{fu} (MPa)	5300	5300																																																								
V_{fibre} (%)	70	70																																																								
4. Dettagli armatura (se disponibili) <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Pilastro sup. d_i (mm)</th> <th>Pilastro inf. d_i (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A_{s1} (mm²)</td> <td>4</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>A_{s2} (mm²)</td> <td>4</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>A_{s3} (mm²)</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Trave sinistra</th> <th>Trave destra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A_{s1} (mm²)</td> <td>1005</td> <td>804</td> </tr> <tr> <td>A_{s2} (mm²)</td> <td>1005</td> <td>804</td> </tr> <tr> <td>copriferro (mm)</td> <td>30</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Pilastro sup. d_i (mm)	Pilastro inf. d_i (mm)	A_{s1} (mm ²)	4	14	A_{s2} (mm ²)	4	14	A_{s3} (mm ²)				Trave sinistra	Trave destra	A_{s1} (mm ²)	1005	804	A_{s2} (mm ²)	1005	804	copriferro (mm)	30		7. Verifica di resistenza a trazione (Circolare 2019) $0.3\sqrt{f_{cd}} \text{ (MPa)} \geq \sigma_t \text{ (MPa)}$ Capacità 1.12 $\geq$ 1.01 Domanda max Esito Verifica soddisfatta																																
	Pilastro sup. d_i (mm)	Pilastro inf. d_i (mm)																																																								
A_{s1} (mm ²)	4	14																																																								
A_{s2} (mm ²)	4	14																																																								
A_{s3} (mm ²)																																																										
	Trave sinistra	Trave destra																																																								
A_{s1} (mm ²)	1005	804																																																								
A_{s2} (mm ²)	1005	804																																																								
copriferro (mm)	30																																																									
5. Proprietà dei materiali <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Calcestruzzo</th> <th colspan="2">Acciaio</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>f_{cm} (MPa)</td> <td>25</td> <td>f_{ym} (MPa)</td> <td>375</td> </tr> <tr> <td>F.C.</td> <td>1.35</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>γ_c (fragili)</td> <td>1.35</td> <td>γ_{Rd}</td> <td>1.15</td> </tr> </tbody> </table>		Calcestruzzo		Acciaio		f_{cm} (MPa)	25	f_{ym} (MPa)	375	F.C.	1.35			γ_c (fragili)	1.35	γ_{Rd}	1.15	8. Progetto rinforzo FRP Tipologia tessuto: Quadriassiale (0°, ±45°, ...) ☒ Nodo pre-danneggiato <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>t_r (mm)</th> <th>E_r (MPa)</th> <th>ϵ_{rk}</th> <th>η_a</th> <th>γ_r</th> <th>η_s</th> <th>η_l</th> <th>ϵ_{rd}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>10</td> <td>260</td> <td>1.7</td> <td>0.95</td> <td>1.2</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0.01435</td> </tr> </tbody> </table>			t_r (mm)	E_r (MPa)	ϵ_{rk}	η_a	γ_r	η_s	η_l	ϵ_{rd}		10	260	1.7	0.95	1.2	1	1	0.01435																					
Calcestruzzo		Acciaio																																																								
f_{cm} (MPa)	25	f_{ym} (MPa)	375																																																							
F.C.	1.35																																																									
γ_c (fragili)	1.35	γ_{Rd}	1.15																																																							
	t_r (mm)	E_r (MPa)	ϵ_{rk}	η_a	γ_r	η_s	η_l	ϵ_{rd}																																																		
	10	260	1.7	0.95	1.2	1	1	0.01435																																																		
6. Sollecitazioni <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Pilastro sup.</th> <th>Pilastro inf.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N_{Ed} (kN)</td> <td>222</td> <td>217</td> </tr> <tr> <td>M_{Ed} (kNm)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>M_{Ed} (kNm)</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Pilastro sup.	Pilastro inf.	N_{Ed} (kN)	222	217	M_{Ed} (kNm)			M_{Ed} (kNm)			9. Verifica di resistenza nodo rinforzato $0.3\sqrt{f_{cd}} + \sigma_{t,FRP} \text{ (MPa)} \geq \sigma_t \text{ (MPa)}$ Capacità resistente 1.3 $\geq$ 1.01 Domanda max Incremento di capacità resistente nodo 16% Esito Snervamento pilastro Verifica soddisfatta																																												
	Pilastro sup.	Pilastro inf.																																																								
N_{Ed} (kN)	222	217																																																								
M_{Ed} (kNm)																																																										
M_{Ed} (kNm)																																																										
12. Interazione Tamponatura ☒ Nessuna interazione ☐ Rinforzo per spinta tamponatura		13. Dimensioni <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>L_{sfoc} (mm)</th> <th>L_{sfoc} (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Luca (netta campata) (mm)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Altezza netta interpiano (mm)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Spessore di sovrapposizione (mm)</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> 			L_{sfoc} (mm)	L_{sfoc} (mm)	Luca (netta campata) (mm)			Altezza netta interpiano (mm)			Spessore di sovrapposizione (mm)																																													
	L_{sfoc} (mm)	L_{sfoc} (mm)																																																								
Luca (netta campata) (mm)																																																										
Altezza netta interpiano (mm)																																																										
Spessore di sovrapposizione (mm)																																																										

Fa riferimento al nodo intermedio del Piano Rialzato. Per questo intervento è prevista una fasciatura su superficie esterna con tessuto quadriassiale tipo C-SHEET 240/380 127 Q con estensione del tessuto sulle porzioni di travi e pilastri per 1 m. Connettori a fiocco tipo CFIX 10 e resina epossidica per Inghisaggio tipo RESIN 75.

PILASTRO/TRAVE N.55 – PIANO RIALZATO

1. Approccio progettuale

☒ Rinforzo locale (S8.4.1, NTC 2018)

☐ Basato su valori scelti delle sollecitazioni

2. Tipologia nodo

☐ Nodo d'angolo

☒ Nodo parete

3. Geometria

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
h_c (mm)	300	300
b_c (mm)	500	500
h_b (mm)	350	350
b_b (mm)	700	1200
luce campata (mm)	2500	6300
altezza interpiano (mm)	3900	3300

4. Dettagli armatura (se disponibili)

	Pilastro sup. d_i (mm)	Pilastro inf. d_i (mm)
A_{s1} (mm ²)	4	14
A_{s2} (mm ²)	4	14
A_{s3} (mm ²)		

	Trave sinistra	Trave destra
A_{s1} (mm ²)	1206	1608
A_{s2} (mm ²)	1206	1608
copriferro (mm)	30	

5. Proprietà dei materiali

	Calcestruzzo	Acciaio
f_{cm} (MPa)	25	f_{ym} (MPa) 375
F.C.	1.35	
γ_c (fragili)	1.35	γ_{td} 1.15

6. Sollecitazioni

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
N_{Ed} (kN)	270	452
V_{Ed} (kN)		
M_{Ed} (kNm)		

7. Verifica di resistenza a trazione (Circolare 2019)

$0.3 \cdot v_{fcd}$ (MPa) $\geq \sigma_t$ (MPa)

Capacità **1.11** < **1.28** Domanda max

Esito **Crisi a taglio trazione del nodo**

8. Progetto rinforzo FRP

Tipologia tessuto **Quadriassiale (0°, ±45°, ...)**

☒ Nodo pre-danneggiato

t_r (mm)	10
E_r (MPa)	260
ε_{fr}	1.7
η_a	0.95
γ_r	1.2
n_s	1
n_i	1
ε_{fd}	0.01435

9. Verifica di resistenza nodo rinforzato

$0.3 \cdot v_{fcd} + \sigma_{t,FRP}$ (MPa) $\geq \sigma_t$ (MPa)

Capacità resistente **1.3** $\geq$ **1.27** Domanda max

Incremento di capacità resistente nodo **16%**

Esito **Snervamento pilastro**
Verifica soddisfatta

10. Ancoraggi meccanici

☐ Fasciatura ad U estremità travi

☒ Fiochi (solo esterno)

11. Progetto fiochi

	Trave	Pilastro
Φ_{fiocco} (mm)	10	10
Linghisaggio (mm)	200	200
$L_{sfiocco}$ (mm)	200	200
$\alpha_{sfiocco}$ (°)	90	90
Φ_{foro} (mm)	14	14
V_{resina} (MPa)	130000	130000
f_{fu} (MPa)	5300	5300
V_{fibre} (%)	70	70

N° ancoraggi su ogni trave **3**

N° ancoraggi su ogni pilastro **2**

☐ Fiochi non ancoraggi a trave **4**

12. Interazione Tamponatura

☒ Nessuna interazione

☐ Rinforzo per spinta tamponatura

Fa riferimento al nodo intermedio del Piano Rialzato. Per questo intervento è prevista una fasciatura su superficie esterna con tessuto quadriassiale tipo C-SHEET 240/380 127 Q con estensione del tessuto sulle porzioni di travi e pilastri per 1 m. Connettori a fiocco tipo CFIX 10 e resina epossidica per Inghisaggio tipo RESIN 75.

1. Approccio progettuale

☒ Rinforzo locale (\$8.4.1, NTC 2018)
☐ Basato su valori scelti delle sollecitazioni

2. Tipologia nodo

☐ Nodo d'angolo
☒ Nodo parete

3. Geometria

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
h_c (mm)	300	300
b_c (mm)	500	500
	Trave sinistra	Trave destra
h_b (mm)	350	350
b_b (mm)	700	1200
	Sinistra	Destra
luce campata (mm)	2500	6300
	Superiore	Inferiore
altezza interpiano (mm)	3900	3300

4. Dettagli armatura (se disponibili)

	Pilastro sup. d_i (mm)	Pilastro inf. d_i (mm)
A_{S1} (mm ²)	4 14	4 14
A_{S2} (mm ²)	4 14	4 14
A_{S3} (mm ²)		
	Trave sinistra	Trave destra
A_{S1} (mm ²)	1206	1407
A_{S2} (mm ²)	1206	1407
copriferro (mm)	30	

5. Proprietà dei materiali

Calcestruzzo		Acciaio
f_{cm} (MPa)	25	f_{yk} (MPa)
F.C.	1.35	375
γ_c (fragili)	1.35	γ_{sd}
	1.15	

6. Sollecitazioni

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
N_{Ed} (kN)	353	353
V_{Ed} (kN)		
	Trave sinistra	Trave destra
M_{Ed} (kNm)		

7. Verifica di resistenza a trazione (Circolare 2019)
$$0.3 \cdot \sqrt{f_{cd}} \text{ (MPa)} \geq \sigma_{jt} \text{ (MPa)}$$

Capacità **1.12** $\geq$ **1.11** Domanda max

Esito **Verifica soddisfatta**

8. Progetto rinforzo FRP

Tipologia tessuto

☒ Nodo pre-danneggiato

t_f (mm)	10	$\sigma_{f, \text{max}}$ (MPa)	
E_f (MPa)	260	$\sigma_{f, \text{lim}}$ (MPa)	
ϵ_{fk}	1.7	$\sigma_{f, \text{max}}$ (MPa)	
η_a	0.95	$\sigma_{f, \text{lim}}$ (MPa)	
γ_f	1.2	$\sigma_{f, \text{max}}$ (MPa)	
η_s	1	$\sigma_{f, \text{lim}}$ (MPa)	
η_i	1	$\sigma_{f, \text{max}}$ (MPa)	
ϵ_{fd}	0.01435	$\sigma_{f, \text{lim}}$ (MPa)	

9. Verifica di resistenza nodo rinforzato
$$0.3 \cdot \sqrt{f_{cd}} + \sigma_{jt, FRP} \text{ (MPa)} \geq \sigma_{jt} \text{ (MPa)}$$

Capacità resistente **1.3** $\geq$ **1.11** Domanda max

Incremento di capacità resistente nodo **16%**

Esito **Snervamento pilastro**

Verifica soddisfatta

10. Ancoraggi meccanici

☐ Fasciatura ad U estremità travi
☒ Fiochi (solo esterno)

11. Progetto fiochi

	Trave	Pilastro
Φ_{fiocco} (mm)	10	10
$L_{inghiacciaio}$ (mm)	200	200
L_{fiocco} (mm)	200	200
α_{fiocco} (°)	90	90
Φ_{foro} (mm)	14	14
V_{resina} (MPa)	130000	130000
f_{fu} (MPa)	5300	5300
V_{fibre} (%)	70	70

N° ancoraggi su ogni trave **3**

N° ancoraggi su ogni pilastro **2**

☐ Fiochi multi ancoraggi: **4**

12. Interazione Tamponatura

☒ Nessuna interazione
☐ Rinforzo per spinta tamponatura

13. Tamponatura

$L_{\text{spina}} \text{ (mm)}$	
$L_{\text{cassa}} \text{ (mm)}$	
Lucente (mm)	
Altezza testa (mm)	
Spessore tamponatura (mm)	
γ_f (°)	
$\sigma_{f, \text{max}}$ (MPa)	
$\sigma_{f, \text{lim}}$ (MPa)	

Marchi registrati: Dual Seal® - FRP System® - Steel Net® - Armophalt® - Matacryl® - Superstop® - Concrete Rock® - Floor System® - GP Sunzenit® - Krypton® - Damp Stop® - Cemesan®

PILASTRO/TRAVE N.72 – PIANO RIALZATO

1. Approccio progettuale
☒ Rinforzo locale (S8.4.1, NTC 2018)
☐ Basato su valori scelti delle sollecitazioni

2. Tipologia nodo
☐ Nodo d'angolo
☒ Nodo parete

3. Geometria

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
h_c (mm)	300	300
b_c (mm)	500	500
h_b (mm)	350	350
b_b (mm)	700	300
luce campata (mm)	6700	5920
altezza interpiano (mm)	3900	3300

4. Dettagli armatura (se disponibili)

	Pilastro sup. d_i (mm)	Pilastro inf. d_i (mm)
A_{s1} (mm ²)	4	14
A_{s2} (mm ²)	4	14
A_{s3} (mm ²)		

	Trave sinistra	Trave destra
A_{s1} (mm ²)	804	804
A_{s2} (mm ²)	804	804
copriferro (mm)	30	

5. Proprietà dei materiali

	Calcestruzzo	Acciaio
f_{cm} (MPa)	25	f_{yk} (MPa) 375
F.C.	1,35	
γ_c (fragili)	1,35	γ_{Rd} 1,15

6. Sollecitazioni

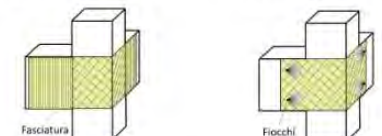
	Pilastro sup.	Pilastro inf.
N_{Ed} (kN)	175	184
M_{Ed} (kNm)		
V_{Ed} (kN)		

7. Verifica di resistenza a trazione (Circolare 2019)
 $0.3 \cdot \sqrt{f_{cd}}$ (MPa) $\geq$ σ_{jt} (MPa)
Capacità 1,12 $\geq$ 0,97 Domanda max.
Esito **Verifica soddisfatta**

8. Progetto rinforzo FRP
Tipologia tessuto: Quadriassiale (0°, $\pm 45^\circ$)
☒ Nodo pre-danneggiato

t_r (mm)	10	σ_{fr} (MPa)	
E_f (MPa)	260	ϵ_{fr}	
α_{fr}	1,7	σ_{fr} (MPa)	
η_a	0,95	σ_{fr} (MPa)	
η_f	1,2	σ_{fr} (MPa)	
η_s	1	σ_{fr} (MPa)	
η_l	1	σ_{fr} (MPa)	
ϵ_{td}	0,01435	σ_{fr} (MPa)	

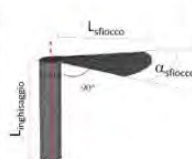
9. Verifica di resistenza nodo rinforzato
 $0.3 \cdot \sqrt{f_{cd}} + \sigma_{fr,FRP}$ (MPa) $\geq$ σ_{jt} (MPa)
Capacità resistente 1,3 $\geq$ 0,97 Domanda max.
Incremento di capacità resistente nodo 16%
Esito **Snervamento pilastro**
Verifica soddisfatta

10. Ancoraggi meccanici
☐ Fasciatura ad U estremità travi
☒ Fioocchi (solo esterno)


11. Progetto fioocchi

	Trave	Pilastro
$\Phi_{fioocco}$ (mm)	10	10
Linghisaggio (mm)	200	200
$L_{fioocco}$ (mm)	200	200
$\alpha_{fioocco}$ (°)	90	90
Φ_{foro} (mm)	14	14
V_{resina} (MPa)	130000	130000
f_{tu} (MPa)	5300	5300
V_{fibra} (%)	70	70

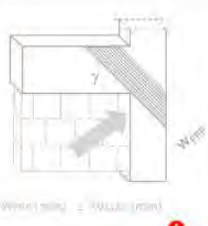
N° ancoraggi su ogni trave 3
 N° ancoraggi su ogni pilastro 2
☐ Esercitare ancoraggi travi 4



12. Interazione Tamponatura
☒ Nessuna interazione
☐ Rinforzo per spinta tamponatura

13. Tamponatura

$f_{ct,FRP}$	
$f_{ct,FRP}$ (MPa)	
Luogo della intersezione (mm)	
Altezza vista interpilastro (mm)	
Spessore tamponatura (mm)	
γ_{FR}	
$f_{tu,FRP}$	
$f_{t,FRP}$	



Fa riferimento al nodo intermedio del Piano Rialzato. Per questo intervento è prevista una fasciatura su superficie esterna con tessuto quadriassiale tipo C-SHEET 240/380 127 Q con estensione del tessuto sulle porzioni di travi e pilastri per 1 m. Connettori a fiocco tipo CFIX 10 e resina epossidica per Inghisaggio tipo RESIN 75.

PILASTRO/TRAVE N.77 – PIANO RIALZATO

1. Approccio progettuale
☒ Rinforzo locale (S8.4.1, NTC 2018)
☐ Basato su valori scelti delle sollecitazioni

2. Tipologia nodo
☐ Nodo d'angolo
☒ Nodo parete

3. Geometria

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
h_c (mm)	300	300
b_c (mm)	500	500
h_b (mm)	350	350
b_b (mm)	300	300
luce campata (mm)	Sinistra 3700	Destra 5000
altezza interpiano (mm)	Superiore 3900	Inferiore 3300

7. Verifica di resistenza a trazione (Circolare 2019)
 $0.3\sqrt{f_{cd}} \text{ (MPa)} \geq \sigma_{jt} \text{ (MPa)}$
Capacità **1.11** < **1.13** Domanda max
Esito **Crisi a taglio trazione del nodo**

8. Progetto rinforzo FRP
Tipologia tessuto: Quadriassiale ($0^\circ, \pm 45^\circ$)
☒ Nodo pre-danneggiato

	tr (mm)	σ_{jt} (MPa)
E_f (MPa)	10	260
ε_{fk}	1.7	
η_a	0.95	
η_f	1.2	
η_s	1	
η_l	1	
σ_{fd}	0.01435	

10. Ancoraggi meccanici
☐ Fasciatura ad U estremità travi
☒ Fioocchi (solo esterno)

11. Progetto fioocchi

	Trave	Pilastro
Φ fioocco (mm)	10	10
Linghisaggio (mm)	200	200
L_{fioocco} (mm)	200	200
α_{fioocco} ($^\circ$)	90	90
Φ foro (mm)	14	14
V_{resina} (MPa)	130000	130000
f_{fu} (MPa)	5300	5300
V_{fibre} (%)	70	70
N° ancoraggi su ogni trave	3	
N° ancoraggi su ogni pilastro		2

12. Interazione Tamponatura
☒ Nessuna interazione
☐ Rinforzo per spinta tamponatura

13. Verifica di resistenza nodo rinforzato
 $0.3\sqrt{f_{cd}} + \sigma_{jt,FRP} \text{ (MPa)} \geq \sigma_{jt} \text{ (MPa)}$
Capacità resistente **1.3** $\geq$ **1.12** Domanda max
Incremento di capacità resistente nodo **16%**
Esito **Snervamento pilastro**
Verifica soddisfatta

Fa riferimento al nodo intermedio del Piano Rialzato. Per questo intervento è prevista una fasciatura su superficie esterna con tessuto quadriassiale tipo C-SHEET 240/380 127 Q con estensione del tessuto sulle porzioni di travi e pilastri per 1 m. Connettori a fiocco tipo CFIX 10 e resina epossidica per Inghisaggio tipo RESIN 75.

1. Approccio progettuale
☒ Rinforzo locale (\$8.4.1, NTC 2018)
☐ Basato su valori scelti delle sollecitazioni

2. Tipologia nodo
☒ Nodo d'angolo
☐ Nodo parete

3. Geometria

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
h _c (mm)	300	300
b _c (mm)	500	500
Trave		
h _b (mm)	350	350
b _b (mm)	300	300
Sinistra Destra		
luce campata (mm)	5920	5000
Superiore Inferiore		
altezza interpiano (mm)	3900	3300

4. Dettagli armatura (se disponibili)

	Pilastro sup. d _j (mm)	Pilastro inf. d _j (mm)
A _{s1} (mm ²)	4 14	4 14
A _{s2} (mm ²)	4 14	4 14
A _{s3} (mm ²)		
Trave		
A _{s1} (mm ²)	804	1005
A _{s2} (mm ²)	804	1407
copriferro (mm)	30	

5. Proprietà dei materiali

Calcestruzzo		Acciaio	
f _{cm} (MPa)	25	f _{yk} (MPa)	375
F.C.	1.35		
γ _c (fragili)	1.35	γ _{st}	1.15

6. Sollecitazioni

	Pilastro sup.	Pilastro inf.
N _{Ed} (kN)	247	174
M _{1Ed} (kNm)		
Trave		
M _{1Ed} (kNm)		

7. Verifica di resistenza a trazione (Circolare 2019)
$$0.3\sqrt{f_{cd}} \geq \sigma_{tR} \text{ (MPa)}$$

Capacità **1.11** < **1.18** Domanda max

Esito **Crisi a taglio trazione del nodo**

8. Progetto rinforzo FRP

Tipologia tessuto **Quadiassiale (0°, ±45°, ...)**

☒ Nodo pre-danneggiato

t _r (mm)	10	30 (travi)
E _r (MPa)	260	111.11
ε _{Rk}	1.7	0.4 (travi)
η _a	0.95	0.75
γ _r	1.2	0.2 (travi)
η _b	1	0.75
η _i	1	0.75 (travi)
ε _{Ed}	0.01435	0.75

9. Verifica di resistenza nodo rinforzato
$$0.3\sqrt{f_{cd}} + \sigma_{tFRP} \text{ (MPa)} \geq \sigma_{tR} \text{ (MPa)}$$

Capacità resistente **1.3** ≥ **1.17** Domanda max

Incremento di capacità resistente nodo **16%**

Esito **Snervamento pilastro**
Verifica soddisfatta

10. Ancoraggi meccanici
☐ Fasciatura ad U estremità travi
☒ Fiochetti (solo esterno)

11. Progetto fiochetti

	Trave	Pilastro
Φ fioccio (mm)	10	10
L _{ingh} agggio (mm)	200	200
L _{fio} ccio (mm)	200	200
α _{fio} ccio (°)	90	90
Φ _{foro} (mm)	14	14
V _{resina} (MPa)	130000	130000
f _{td} (MPa)	5300	5300
V _{fibre} (%)	70	70

N° ancoraggi su ogni trave **3**

N° ancoraggi su ogni pilastro **2**

☐ Travi non ancoraggi travi **4**

12. Interazione Tamponatura
☒ Nessuna interazione
☐ Rinforzo per spinta tamponatura

13. Tamponatura

f _{td} (MPa)	
f _{td} (MPa)	
luce netta in trave (mm)	
Altezza netta in pilastro (mm)	
Spessore tamponatura (mm)	
γ _{td} (°)	
f _{td} (MPa)	
L _{td} (mm)	

Verifica geometrica

Esito **Verifica soddisfatta**

14. Verifica di resistenza nodo tamponato
$$0.3\sqrt{f_{cd}} + \sigma_{tFRP} \text{ (MPa)} \geq \sigma_{tR} \text{ (MPa)}$$

Capacità resistente **1.3** ≥ **1.17** Domanda max

Incremento di capacità resistente nodo **16%**

Esito **Snervamento pilastro**
Verifica soddisfatta

CONFINAMENTO ESTREMITA' DEI PILASTRI E DELLE TRAVI

L'incremento della resistenza a taglio delle estremità delle travi viene realizzato con tessuto in carbonio uniassiale C-SHEET 240/300 in singolo strato continuo in avvolgimento U-WRAP per una lunghezza pari ad almeno 100 cm.

4 ESEMPIO DI SCHEMA APPLICATIVO RINFORZO NODALE

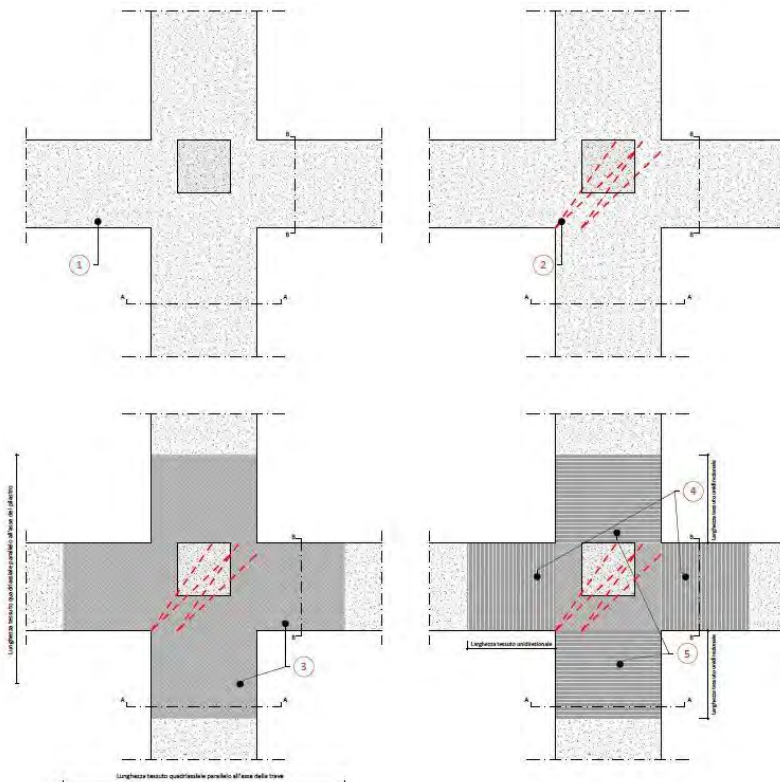


Figura 5: fasi applicative rinforzo nodo trave-pilastro

1. Trattamento del supporto esistente con pulizia e consolidamento dello stesso;
2. Applicazione del primer epossido **RESIN PRIMER** e quindi del tessuto in fibra di carbonio quadriassiale **C-SHEET 240/380/127 Q**, una striscia in orizzontale e una in verticale (ad incrocio sul nodo) per il rinforzo a taglio, impregnati in situ con resina epossidica **RESIN 75**;
3. Rinforzo a taglio delle estremità delle travi mediante applicazione del primer epossido **RESIN PRIMER** e quindi del tessuto in fibra di carbonio **C-SHEET 240/300/50** classe 210C CVT, disposto ad U, impregnati in situ con resina epossidica **RESIN 75**;
4. Rinforzo a confinamento e a taglio delle estremità del pilastro mediante applicazione del primer epossido **RESIN PRIMER** e quindi del tessuto in fibra di carbonio **C-SHEET 240/300/100** classe 210C CVT, in avvolgimento completo, impregnati in situ con resina epossidica **RESIN 75**;
5. Eventuali finiture, previo spolvero al quarzo della superficie a resina ancora fresca.

Ufficio Tecnico

G&P intech

G&P intech srl

Via Retrone, 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)

Tel. 0444/522797 – Fax 0444/348692

C. F. e Partita IVA 03580250243 - Numero REA VI-0336685 - Capitale sociale € 100.000 i.v.

E-mail: info@gpintech.com - Sito internet: www.gpintech.com

Marchi registrati: Dual Seal® - FRP System® - Steel Net® - Armophalt® - Matacyl® - Superstop® - Concrete Rock® - Floor System® - GP Sunzenit® - Kryton® - Damp Stop® - Cemesan®



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **11/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	7
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	7
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	8
Sistema C-SHEET 240/300	8
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	12
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	12
5. Rinforzo a Taglio	16
6. Risultati delle verifiche	21
7. Note e osservazioni	24

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema C-SHEET 240/300 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **300** cm e di altezza pari a **500** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **4** barre con diametro ϕ **14** mm (inferiori) e con n. **2** barre ϕ **14** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **12** mm e passo ϕ **100** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

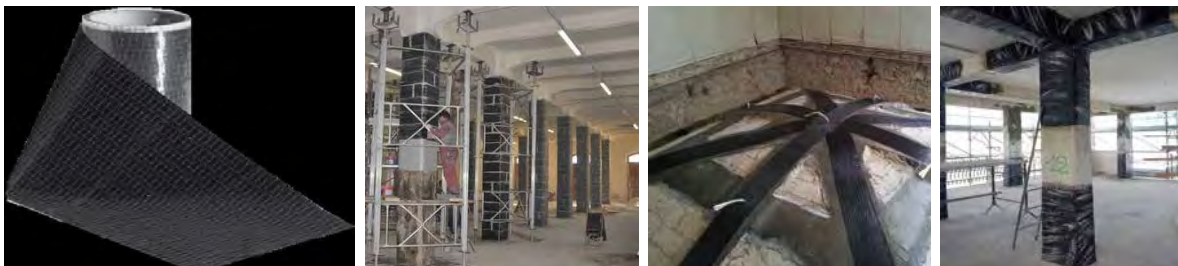
Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA C-SHEET 240/300

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, come il tessuto unidirezionale in fibra di carbonio **C-SHEET 240/300**, con gli adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature.

A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, con tessuto unidirezionale in fibra di carbonio C-SHEET 240/300, il sistema di ancoraggio con i connettori **AFIX** e **CFIX**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi del tessuto unidirezionale in fibra di carbonio **C-SHEET 240/300** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione, taglio e torsione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci;
- rinforzo per confinamento a carico assiale e pressoflessione di colonne e pilastri;
- incremento di duttilità per miglioramento e adeguamento antisismico quali nodi travi-pilastro;
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile;
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche;
- collegamenti di elementi collaboranti ad azioni esterne;
- realizzazioni di cordoli a livello di solaio e di copertura;
- realizzazione di fasce antiribaltamento per azioni fuori dal piano murario;
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario;
- riduzione degli effetti di elementi spingenti;
- rinforzo di travi e solai lignei;
- rinforzo di travi e colonne in acciaio.

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale con il tessuto **C-SHEET 240/300** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di

almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto ($< 4\%$ di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V, V2, S. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Nel caso di strutture murarie di edifici storici e monumentali impiegare malte strutturali in calce idraulica tipo LIMECRETE.

Si procederà quindi alla primerizzazione del supporto regolarizzato con RESIN PRIMER a mezzo pennello o rullo in quantità idonea all'assorbimento del supporto. Dopo il tempo di fuori tatto e comunque entro le 24 ore successive viene applicata, se richiesta, la rasatura con RESIN 90 a mezzo spatola; applicare quindi la resina di incollaggio RESIN 75 a mezzo pennello o rullo. Stendere accuratamente il rinforzo in carbonio secondo l'orientamento di progetto ed esercitare una pressione costante con rullino o manualmente fino a completa impregnazione delle fibre. Dopo alcune ore e comunque entro 24-48 ore stendere una seconda mano ad impregnazione di adesivo. Ripetere il ciclo se sono previsti più strati di rinforzo, utilizzando per gli strati successivi l'adesivo RESIN 75 a pennello o rullo. Ove richiesto dalle disposizioni progettuali, per migliorare l'ancoraggio del tessuto al supporto si procederà all'installazione di connettori in fibra AFIX o CFIX oppure di barre fioccate CFK o BFK a seconda delle indicazioni di progetto.

Questi connettori verranno applicati utilizzando l'adesivo RESIN 75. Per ulteriori indicazioni sull'applicazione di questi connettori consultare le relative schede tecniche. Sulla mano finale di adesivo potrà essere applicata della sabbia di quarzo fresco su fresco, qualora si dovessero realizzare intonaci o rivestimenti successivi in aderenza. La protezione finale della fibra, se prevista, viene applicata al fuori tatto dell'adesivo. Dovrà essere fatta attenzione onde evitare spigoli vivi che vanno sempre smussati ai sensi di norma in quanto inibiscono le caratteristiche prestazionali del rinforzo. In tali casi si dovrà procedere ad una rasatura oppure all'arrotondamento dello spigolo a mezzo flessibile o altro idoneo attrezzo. E' buona norma inoltre sormontare i rinforzi in fibra di almeno 20 cm in direzione della fibra stessa e di 2 cm in direzione trasversale, per esempio nel confinamento di colonne. Per rinforzi a flessione e taglio seguire le indicazioni progettuali. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale con il tessuto **C-SHEET 240/300** sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- Seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- Eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- Manipolare il tessuto con attenzione al fine di evitare danneggiamenti alle fibre in fase esecutiva;
- Controllare visivamente la perfetta impregnazione dell'adesivo nel tessuto di rinforzo, evitando la presenza di zone non bagnate dall'adesivo e di bolle d'aria;
- Il tessuto deve rimanere ben disteso e ben ancorato al fine di trasmettere correttamente le sollecitazioni;
- Evitare nelle zone di estremità affioramenti del tessuto che possono innescare azioni di peeling locali agendo con adeguata impregnazione dell'adesivo;
- Ancorare secondo indicazioni progettuali il tessuto in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali, connettori in fibra AFIX, CFIX o barre fioccate CFK, BFK od altri idonei sistemi secondo le disposizioni progettuali.
- Smussare angoli o asperità preesistenti con $r=2,5$ cm

Caratteristiche dell'adesivo RESIN 75

Tipo di resina:	Epossidica bicomponente
Densità:	1.16 g/cm ³
Viscosità a 23°C:	2700 mPa s
Rapporto di catalisi in peso	3:1
Pot Life a 23°C:	30 min
Modulo elastico a trazione:	4400 MPa
Modulo elastico a flessione:	4500 MPa
Resistenza a trazione:	30 MPa
Allungamento a trazione:	0.9 %
Adesione al calcestruzzo:	>3 MPa
Temperatura di transizione vetrosa Tg:	81 °C

Sistema C-SHEET 240/300				
Classificazione e valori nominali				
		Classe di appartenenza	210 C	
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre			210	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre			2700	MPa
Caratteristiche geometriche e fisiche				
Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Densità delle fibre	ρ_{fib}	g/cm^3	1.82	ISO 10119
Massa del tessuto per unità di area	p_x	g/m^2	300	ISO 3374
Densità della resina	ρ_m	g/cm^3	1.16	ISO 1675
Area equivalente	A_{eq}	mm^2/m	165	UNI EN 2561
Spessore equivalente	t_{eq}	mm	0.165	UNI EN 2561
Frazione in peso delle fibre nel composito	-	%	38	ASTM D2734
Frazione in volume delle fibre nel composito	-	%	28	ISO 1172
Temperatura di transizione vetrosa - primer	-	°C	69	ISO 11357-2:1990 (E) (DSC)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di impregnazione	-	°C	81	ISO 11357-2:1990 (E) (DSC)
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007
Proprietà meccaniche				
Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico del laminato riferita all'area nella fibre (1 strato)	E_f	GPa	247	UNI EN 2561
Modulo elastico del laminato riferita all'area nella fibre (3 strati)	E_f	GPa	256	UNI EN 2561
Resistenza del laminato riferita all'area nella fibre - valore medio (1 strato)	f_{fib}	MPa	3932	UNI EN 2561
Resistenza del laminato riferita all'area nella fibre - valore medio (3 strati)	f_{fib}	MPa	3835	UNI EN 2561
Resistenza del laminato riferita all'area nella fibre - valore caratteristico (1 strato)	f_{fib}	MPa	3301	UNI EN 2561
Resistenza del laminato riferita all'area nella fibre - valore caratteristico (3 strati)	f_{fib}	MPa	3521	UNI EN 2561
Deformazione a rottura (1 strato)	ε_{fib}	%	1.5	UNI EN 2561
Deformazione a rottura (3 strati)	ε_{fib}	%	1.5	UNI EN 2561

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

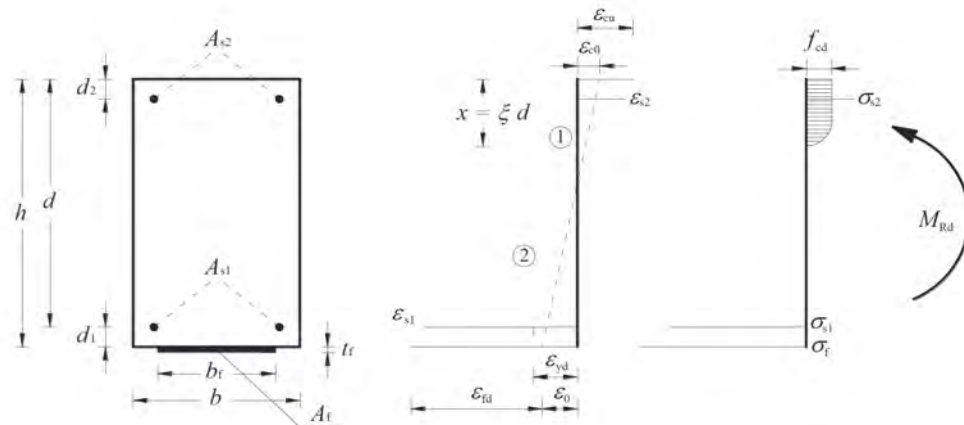


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

(7)

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x}$$

(9)

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

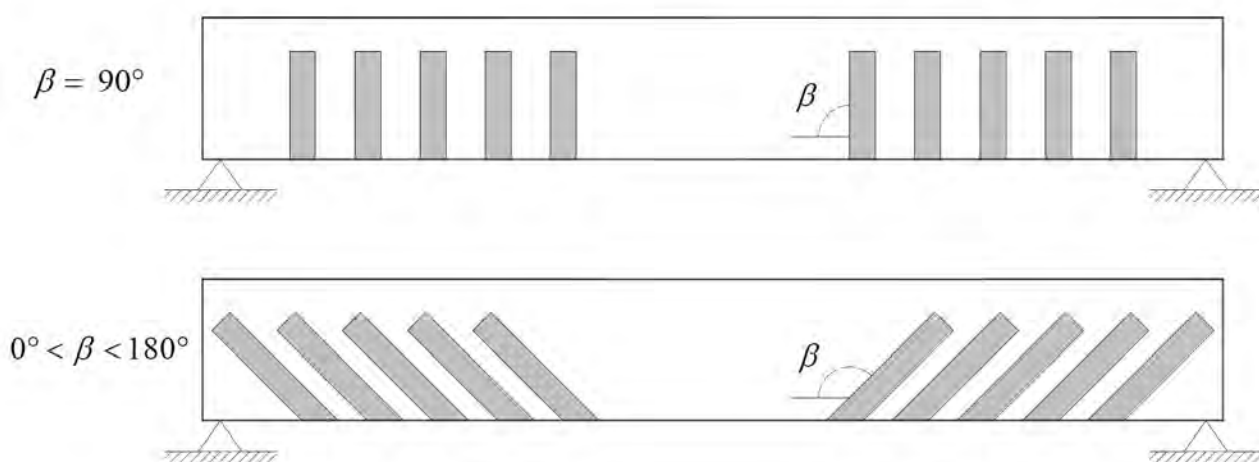


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

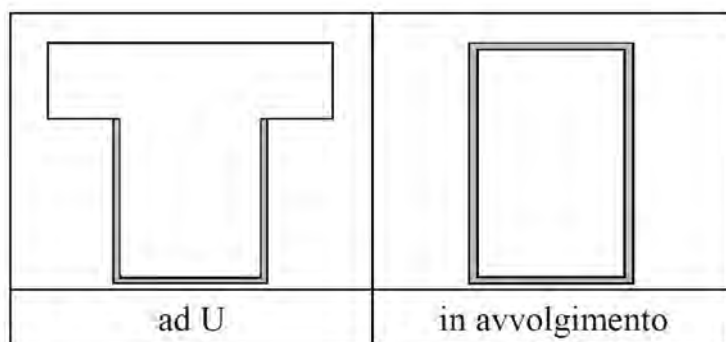


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Mörsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

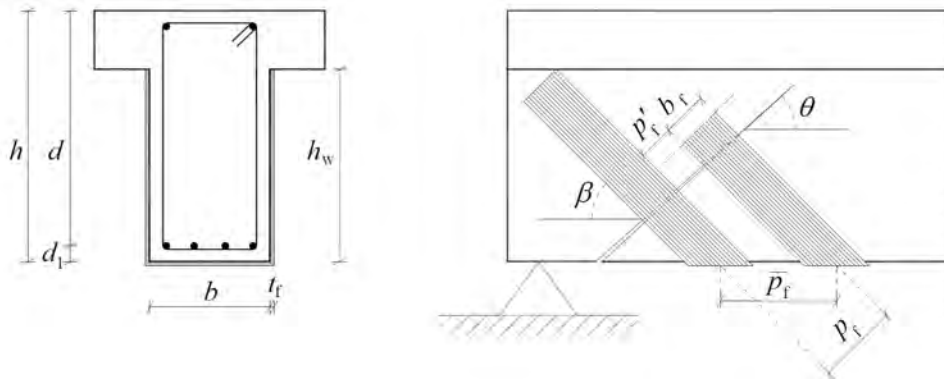


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{F_C} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

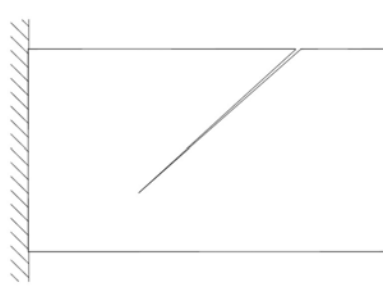


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\Phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\Phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	300	
Altezza	h	mm	500	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	615	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	308	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	<i>kN</i>	33,90
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	<i>kNm</i>	62,80
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	<i>mm</i>	1852,51
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	<i>mm</i>	1544,79
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	<i>mm³</i>	7,944E+05
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	<i>mm⁴</i>	1,344E+09
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	<i>mm</i>	146,91
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	<i>%</i>	0,108%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	<i>kN</i>	33,90
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	<i>kNm</i>	61,10
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,10
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	<i>mm</i>	200
Spessore del laminato	t_f	<i>mm</i>	0,165
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,00
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	<i>MPa</i>	788,57
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	<i>%</i>	0,319%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	<i>kNm</i>	102,07
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione			Verificato

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	1,729	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	13,833	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	1896,06	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	38,72	
Altezza utile	d	mm	470	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	300	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	226	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	100	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$\text{ctg}\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	0,165	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	108,44	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	599,25	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	367,51	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	20,18	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	387,69	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido
- (assorbimento d'acqua 0,1%).
- Eccellente bagnabilità delle fibre in carbonio.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 1-3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **11/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	7
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	7
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	8
Sistema C-SHEET 240/300	8
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	12
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	12
5. Rinforzo a Taglio	16
6. Risultati delle verifiche	21
7. Note e osservazioni	24

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema C-SHEET 240/300 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **400** cm e di altezza pari a **700** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **4** barre con diametro ϕ **14** mm (inferiori) e con n. **4** barre ϕ **14** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **12** mm e passo ϕ **100** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

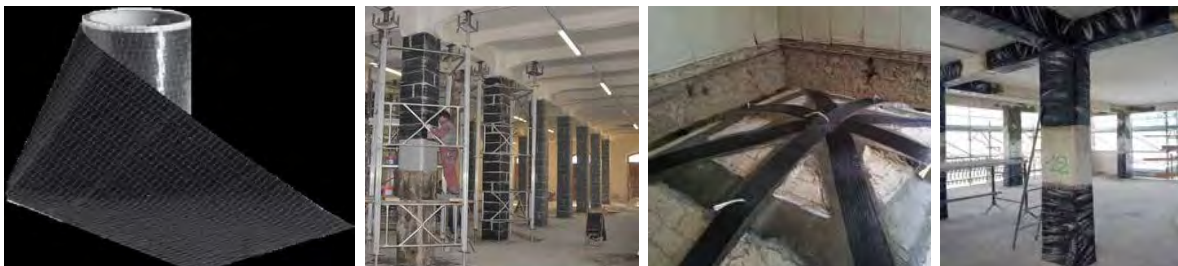
Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA C-SHEET 240/300

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, come il tessuto unidirezionale in fibra di carbonio **C-SHEET 240/300**, con gli adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature.

A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, con tessuto unidirezionale in fibra di carbonio C-SHEET 240/300, il sistema di ancoraggio con i connettori **AFIX** e **CFIX**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi del tessuto unidirezionale in fibra di carbonio **C-SHEET 240/300** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione, taglio e torsione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci;
- rinforzo per confinamento a carico assiale e pressoflessione di colonne e pilastri;
- incremento di duttilità per miglioramento e adeguamento antisismico quali nodi travi-pilastro;
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile;
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche;
- collegamenti di elementi collaboranti ad azioni esterne;
- realizzazioni di cordoli a livello di solaio e di copertura;
- realizzazione di fasce antiribaltamento per azioni fuori dal piano murario;
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario;
- riduzione degli effetti di elementi spingenti;
- rinforzo di travi e solai lignei;
- rinforzo di travi e colonne in acciaio.

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale con il tessuto **C-SHEET 240/300** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di

almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto ($< 4\%$ di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V, V2, S. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Nel caso di strutture murarie di edifici storici e monumentali impiegare malte strutturali in calce idraulica tipo LIMECRETE.

Si procederà quindi alla primerizzazione del supporto regolarizzato con RESIN PRIMER a mezzo pennello o rullo in quantità idonea all'assorbimento del supporto. Dopo il tempo di fuori tatto e comunque entro le 24 ore successive viene applicata, se richiesta, la rasatura con RESIN 90 a mezzo spatola; applicare quindi la resina di incollaggio RESIN 75 a mezzo pennello o rullo. Stendere accuratamente il rinforzo in carbonio secondo l'orientamento di progetto ed esercitare una pressione costante con rullino o manualmente fino a completa impregnazione delle fibre. Dopo alcune ore e comunque entro 24-48 ore stendere una seconda mano ad impregnazione di adesivo. Ripetere il ciclo se sono previsti più strati di rinforzo, utilizzando per gli strati successivi l'adesivo RESIN 75 a pennello o rullo. Ove richiesto dalle disposizioni progettuali, per migliorare l'ancoraggio del tessuto al supporto si procederà all'installazione di connettori in fibra AFIX o CFIX oppure di barre fioccate CFK o BFK a seconda delle indicazioni di progetto.

Questi connettori verranno applicati utilizzando l'adesivo RESIN 75. Per ulteriori indicazioni sull'applicazione di questi connettori consultare le relative schede tecniche. Sulla mano finale di adesivo potrà essere applicata della sabbia di quarzo fresco su fresco, qualora si dovessero realizzare intonaci o rivestimenti successivi in aderenza. La protezione finale della fibra, se prevista, viene applicata al fuori tatto dell'adesivo. Dovrà essere fatta attenzione onde evitare spigoli vivi che vanno sempre smussati ai sensi di norma in quanto inibiscono le caratteristiche prestazionali del rinforzo. In tali casi si dovrà procedere ad una rasatura oppure all'arrotondamento dello spigolo a mezzo flessibile o altro idoneo attrezzo. E' buona norma inoltre sormontare i rinforzi in fibra di almeno 20 cm in direzione della fibra stessa e di 2 cm in direzione trasversale, per esempio nel confinamento di colonne. Per rinforzi a flessione e taglio seguire le indicazioni progettuali. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale con il tessuto **C-SHEET 240/300** sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- Seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- Eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- Manipolare il tessuto con attenzione al fine di evitare danneggiamenti alle fibre in fase esecutiva;
- Controllare visivamente la perfetta impregnazione dell'adesivo nel tessuto di rinforzo, evitando la presenza di zone non bagnate dall'adesivo e di bolle d'aria;
- Il tessuto deve rimanere ben disteso e ben ancorato al fine di trasmettere correttamente le sollecitazioni;
- Evitare nelle zone di estremità affioramenti del tessuto che possono innescare azioni di peeling locali agendo con adeguata impregnazione dell'adesivo;
- Ancorare secondo indicazioni progettuali il tessuto in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali, connettori in fibra AFIX, CFIX o barre fioccate CFK, BFK od altri idonei sistemi secondo le disposizioni progettuali.
- Smussare angoli o asperità preesistenti con $r=2,5$ cm

Caratteristiche dell'adesivo RESIN 75

Tipo di resina:	Epossidica bicomponente
Densità:	1.16 g/cm ³
Viscosità a 23°C:	2700 mPa s
Rapporto di catalisi in peso	3:1
Pot Life a 23°C:	30 min
Modulo elastico a trazione:	4400 MPa
Modulo elastico a flessione:	4500 MPa
Resistenza a trazione:	30 MPa
Allungamento a trazione:	0.9 %
Adesione al calcestruzzo:	>3 MPa
Temperatura di transizione vetrosa Tg:	81 °C

Sistema C-SHEET 240/300				
Classificazione e valori nominali				
		Classe di appartenenza	210 C	
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre			210	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre			2700	MPa
Caratteristiche geometriche e fisiche				
Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Densità delle fibre	ρ_{fib}	g/cm^3	1.82	ISO 10119
Massa del tessuto per unità di area	p_x	g/m^2	300	ISO 3374
Densità della resina	ρ_m	g/cm^3	1.16	ISO 1675
Area equivalente	A_{eq}	mm^2/m	165	UNI EN 2561
Spessore equivalente	t_{eq}	mm	0.165	UNI EN 2561
Frazione in peso delle fibre nel composito	-	%	38	ASTM D2734
Frazione in volume delle fibre nel composito	-	%	28	ISO 1172
Temperatura di transizione vetrosa - primer	-	°C	69	ISO 11357-2:1990 (E) (DSC)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di impregnazione	-	°C	81	ISO 11357-2:1990 (E) (DSC)
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007
Proprietà meccaniche				
Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico del laminato riferita all'area nella fibre (1 strato)	E_f	GPa	247	UNI EN 2561
Modulo elastico del laminato riferita all'area nella fibre (3 strati)	E_f	GPa	256	UNI EN 2561
Resistenza del laminato riferita all'area nella fibre - valore medio (1 strato)	f_{fib}	MPa	3932	UNI EN 2561
Resistenza del laminato riferita all'area nella fibre - valore medio (3 strati)	f_{fib}	MPa	3835	UNI EN 2561
Resistenza del laminato riferita all'area nella fibre - valore caratteristico (1 strato)	f_{fib}	MPa	3301	UNI EN 2561
Resistenza del laminato riferita all'area nella fibre - valore caratteristico (3 strati)	f_{fib}	MPa	3521	UNI EN 2561
Deformazione a rottura (1 strato)	ε_{fib}	%	1.5	UNI EN 2561
Deformazione a rottura (3 strati)	ε_{fib}	%	1.5	UNI EN 2561

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

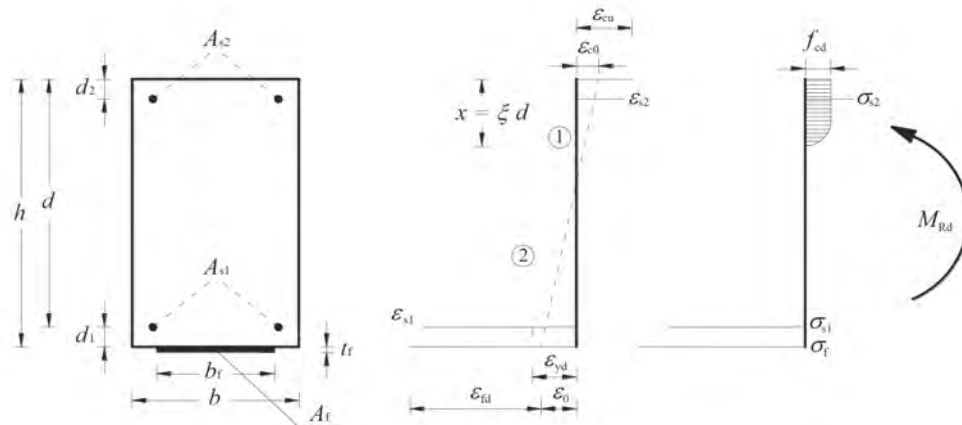


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

(7)

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad (9)$$

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

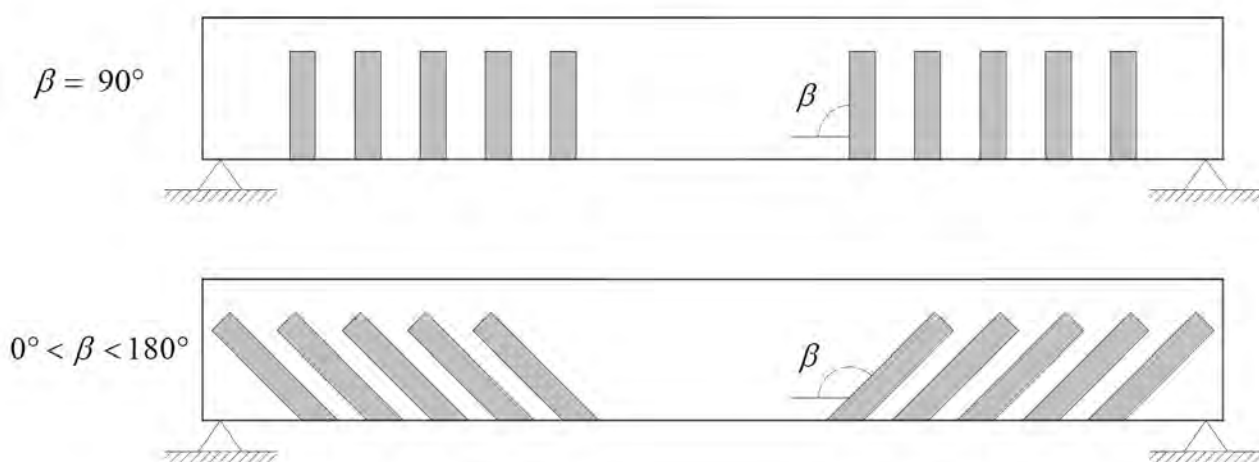


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

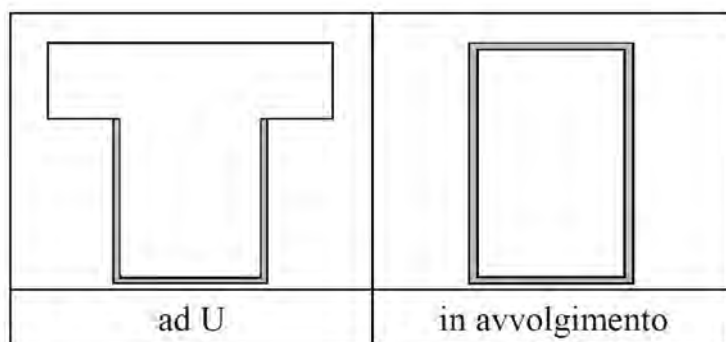


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Mörsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

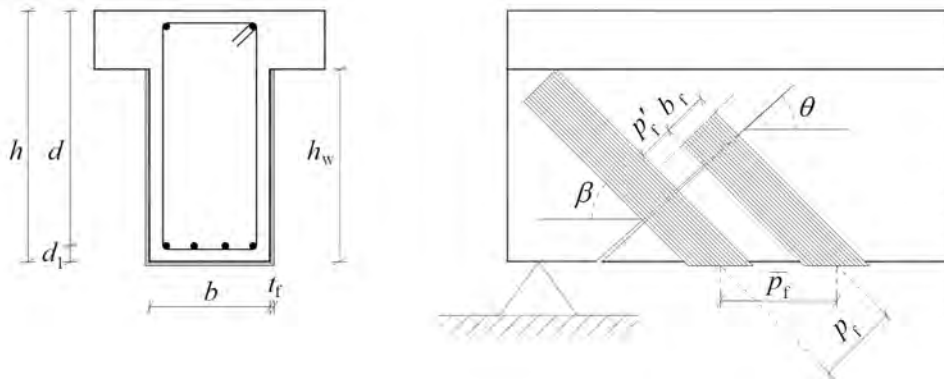


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{F_C} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

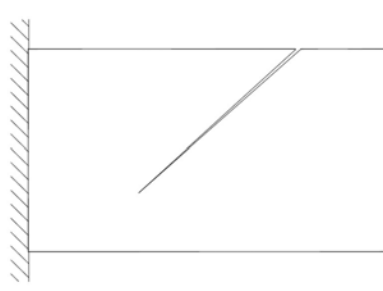


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\Phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\Phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	400	
Altezza	h	mm	700	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	615	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	615	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	kN	49,80
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	kNm	114,34
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	mm	2295,98
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	mm	1988,26
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	mm^3	1,443E+06
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	mm^4	3,097E+09
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	mm	157,94
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	$\%$	0,134%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	kN	113,66
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	kNm	140,67
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,10
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	mm	300
Spessore del laminato	t_f	mm	0,165
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,00
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	MPa	788,57
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	$\%$	0,319%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	kNm	200,21
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione			Verificato

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	1,729	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	13,833	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	1896,06	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{sd}	kN	97,91	
Altezza utile	d	mm	670	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	400	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	226	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	100	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$\text{ctg}\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	0,165	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	500	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	500	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	400	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	1672,61	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	1139,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	523,90	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	443,78	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	967,67	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido
- (assorbimento d'acqua 0,1%).
- Eccellente bagnabilità delle fibre in carbonio.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 1-3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **10/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **400** cm e di altezza pari a **1650** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **4** barre con diametro ϕ **20** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

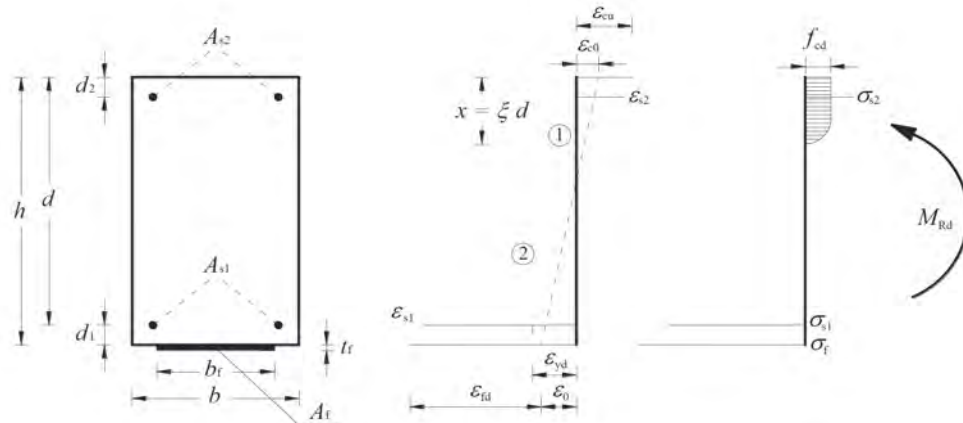


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP
$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

(7)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$

(8)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x-d_2}{x}$

(9)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d-x}{x}$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

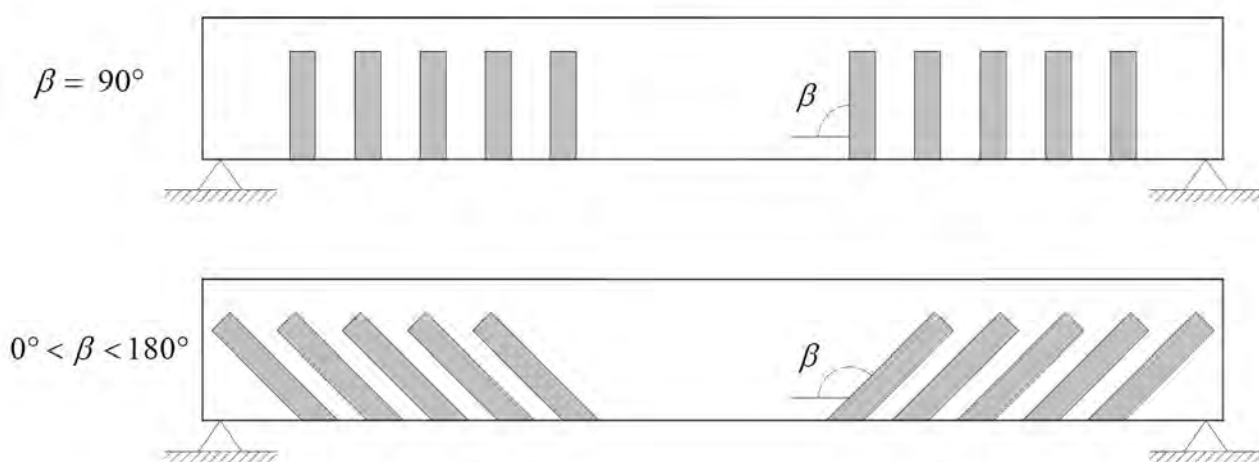


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

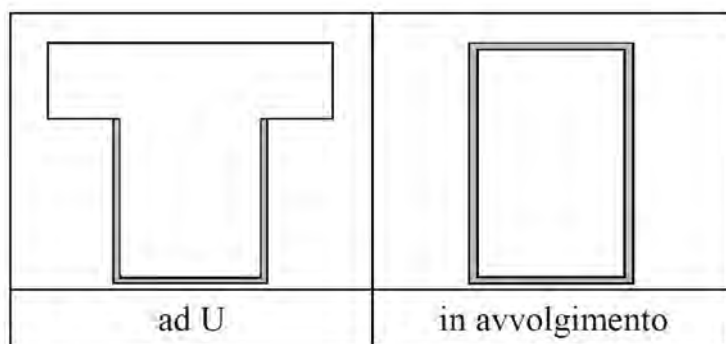


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

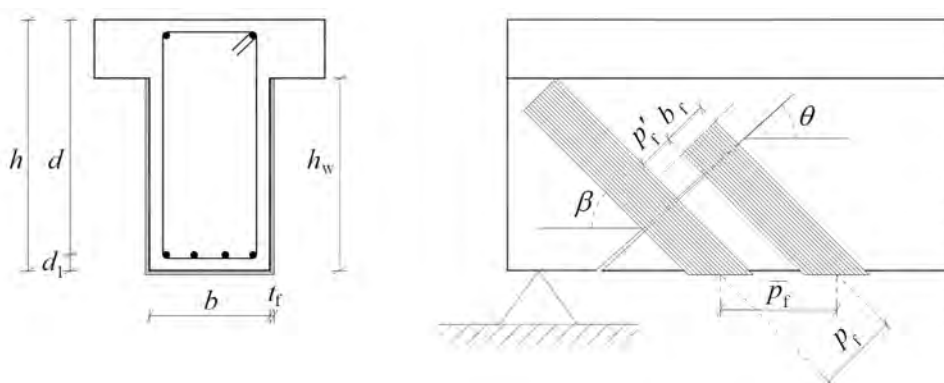


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{F_C} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

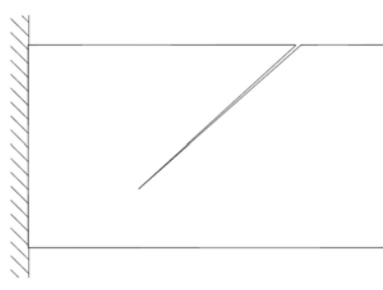


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	400	
Altezza	h	mm	1650	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	1256	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	kN	159,56
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	kNm	164,65
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	mm	1031,90
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	mm	403,90
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	mm^3	4,703E+07
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	mm^4	4,614E+10
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	mm	577,34
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	$\%$	0,026%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	kN	159,86
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	kNm	18,58
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	mm	50
Spessore del laminato	t_f	mm	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,29
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	MPa	276,52
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	$\%$	0,162%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	kNm	894,18
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione			Verificato

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,232	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	17,858	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	664,88	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	54,85	
Altezza utile	d	mm	1620	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	400	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$ctg\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	38,03	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	2754,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	439,84	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	177,41	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	617,25	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **10/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **400** cm e di altezza pari a **1650** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **4** barre con diametro ϕ **20** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

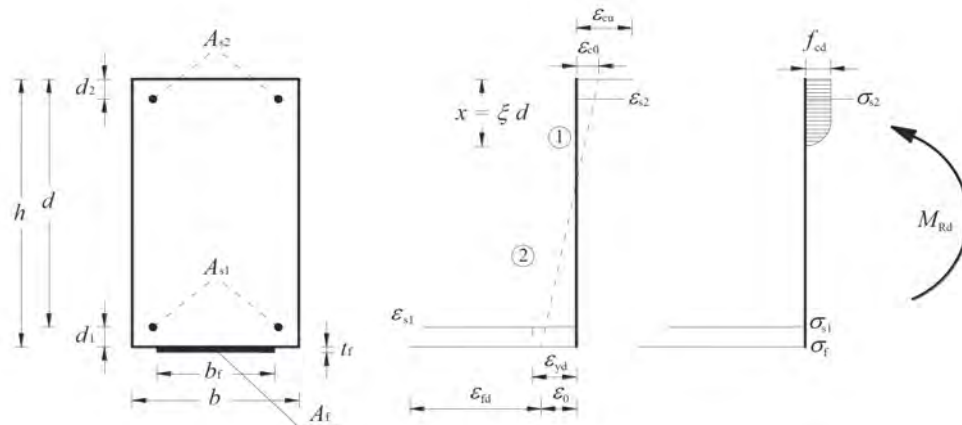


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

(7)

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad (9)$$

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

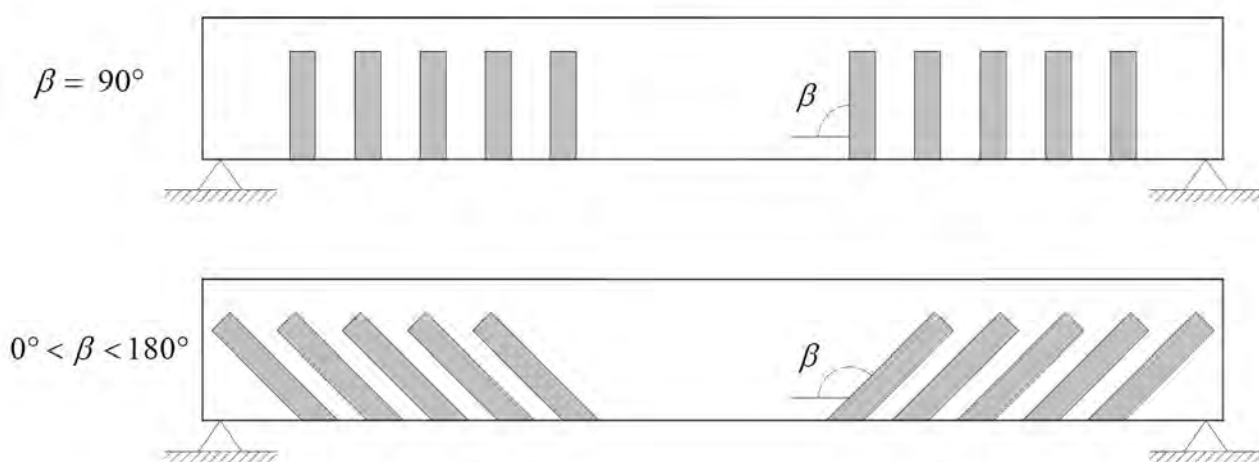


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

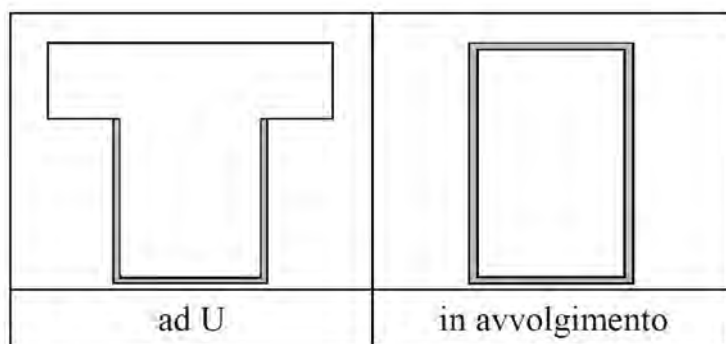


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

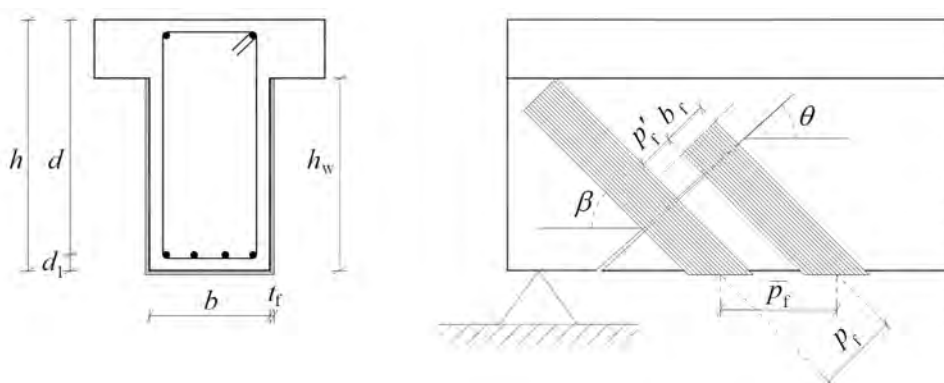


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{F_C} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

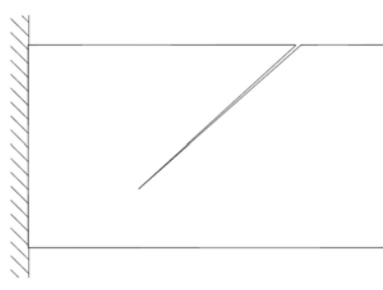


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\Phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\Phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	400	
Altezza	h	mm	1650	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	1256	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	<i>kN</i>	127,40
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	<i>kNm</i>	14,55
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	<i>mm</i>	114,21
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	<i>mm</i>	-513,79
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	<i>mm³</i>	4,795E+08
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	<i>mm⁴</i>	4,971E+11
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	<i>mm</i>	1550,47
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	<i>%</i>	0,000%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	<i>kN</i>	127,40
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	<i>kNm</i>	14,55
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	<i>mm</i>	50
Spessore del laminato	t_f	<i>mm</i>	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,29
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	<i>MPa</i>	276,52
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	<i>%</i>	0,162%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	<i>kNm</i>	844,14
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione			Verificato

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,232	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	17,858	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	664,88	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	39,62	
Altezza utile	d	mm	1620	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	400	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$\text{ctg}\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	38,03	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	2754,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	439,84	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	177,41	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	617,25	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **10/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **400** cm e di altezza pari a **1650** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **4** barre con diametro ϕ **20** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

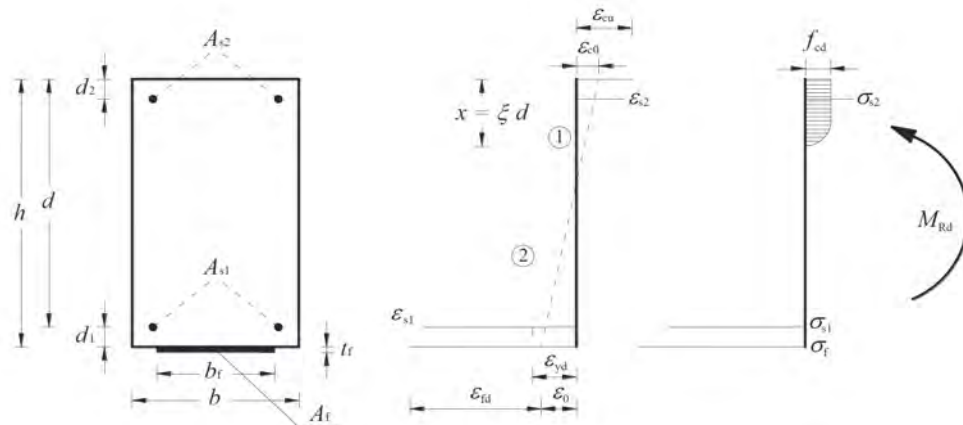


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

(7)

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x}$$

(9)

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

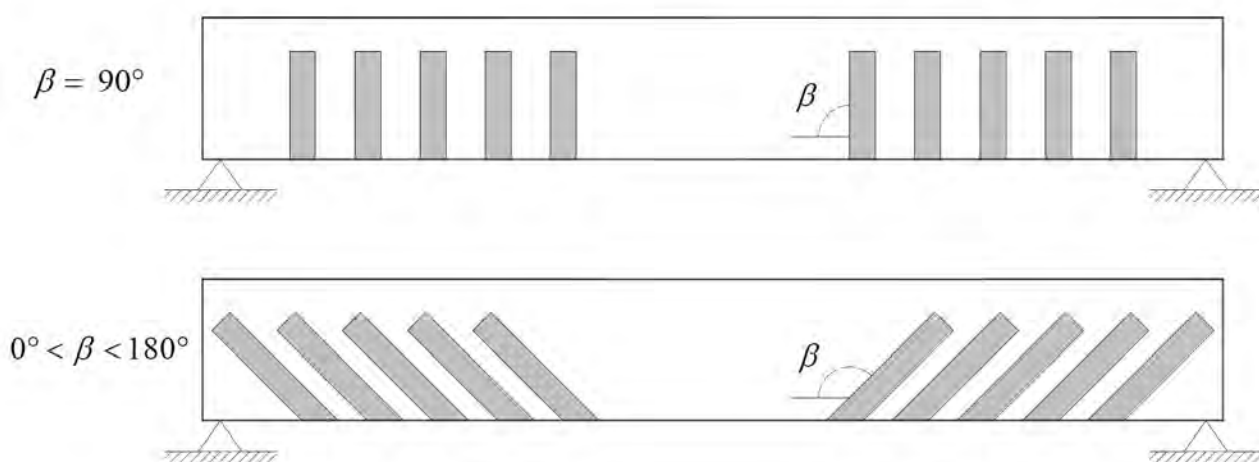


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

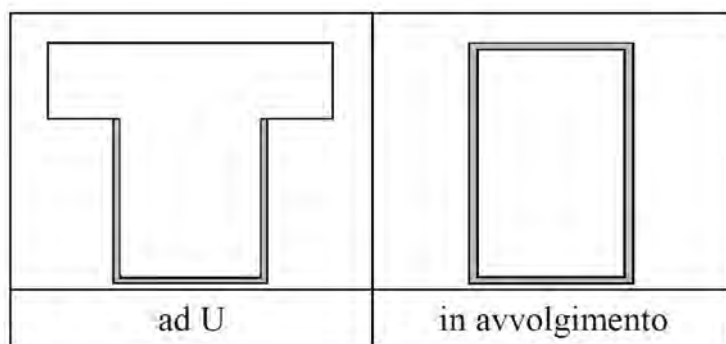


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Mörsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

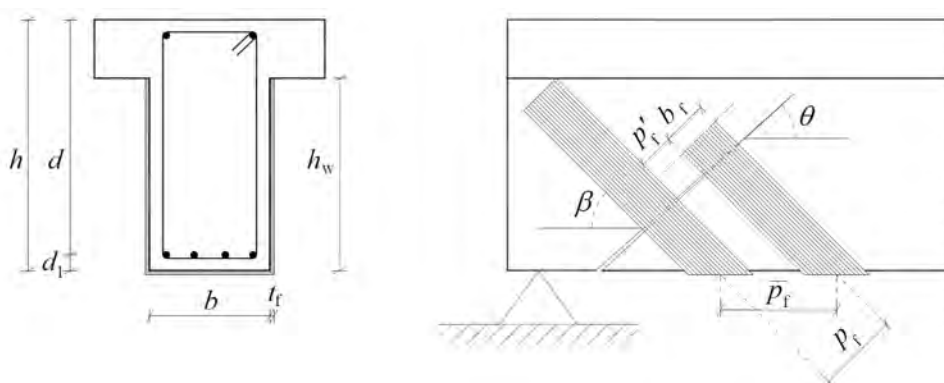


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{F_C} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

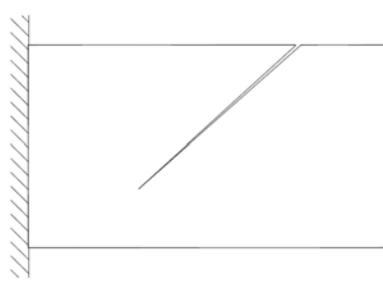


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	400	
Altezza	h	mm	1650	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	1256	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	<i>kN</i>	174,10
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	<i>kNm</i>	14,63
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	<i>mm</i>	84,03
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	<i>mm</i>	-543,97
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	<i>mm³</i>	5,321E+08
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	<i>mm⁴</i>	5,782E+11
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	<i>mm</i>	1630,73
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	<i>%</i>	0,000%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	<i>kN</i>	174,10
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	<i>kNm</i>	198,54
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	<i>mm</i>	50
Spessore del laminato	t_f	<i>mm</i>	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,29
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	<i>MPa</i>	276,52
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	<i>%</i>	0,162%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	<i>kNm</i>	914,98
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione			Verificato

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,232	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	17,858	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	664,88	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	66,15	
Altezza utile	d	mm	1620	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	400	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$\text{ctg}\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	38,03	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	2754,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	439,84	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	177,41	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	617,25	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **10/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **700** cm e di altezza pari a **350** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **2** barre con diametro ϕ **16** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa . Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

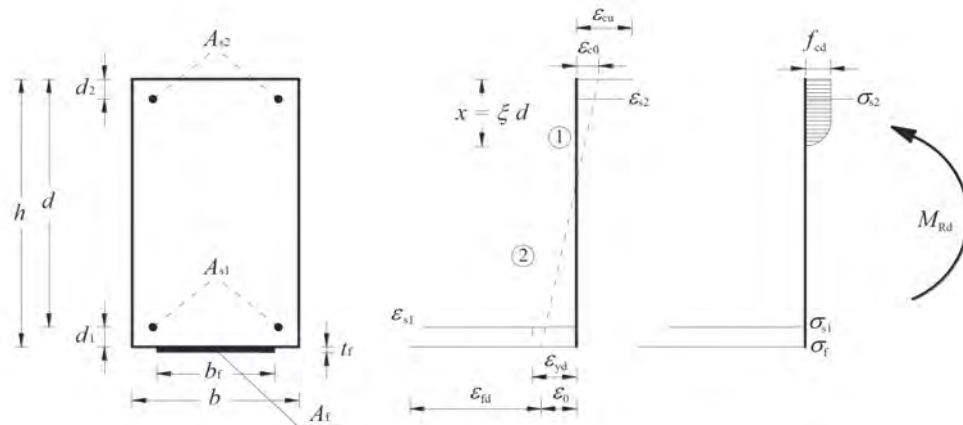


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

(7)

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x}$$

(9)

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

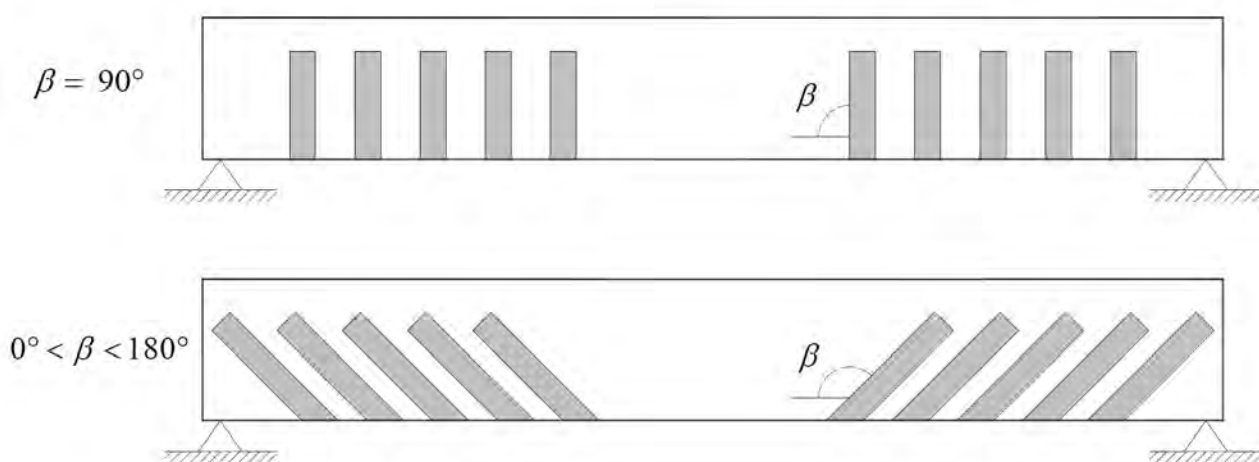


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

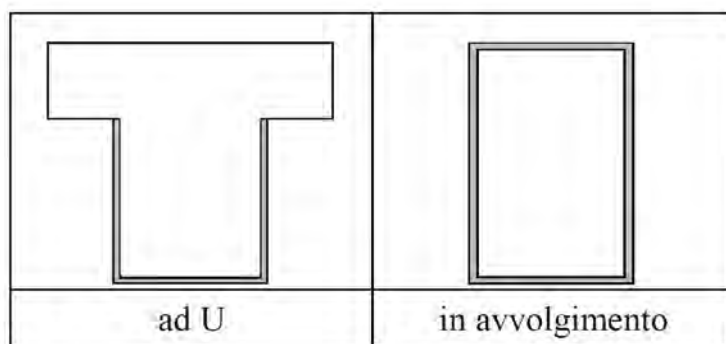


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

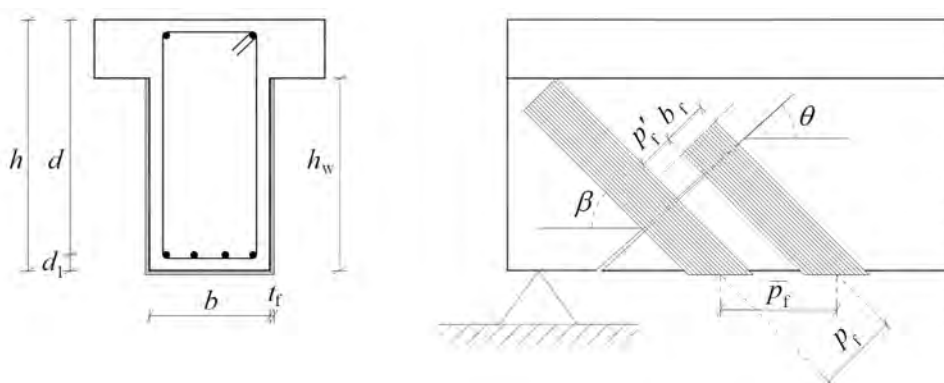


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{F_C} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

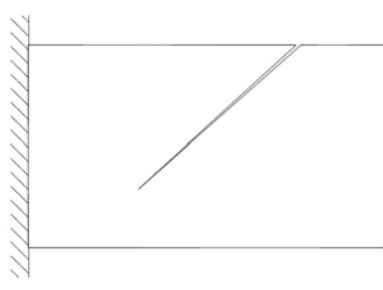


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\Phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\Phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	700	
Altezza	h	mm	350	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	402	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	<i>kN</i>	2,08
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	<i>kNm</i>	41,50
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	<i>mm</i>	19951,92
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	<i>mm</i>	19750,96
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	<i>mm³</i>	2,301E+04
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	<i>mm⁴</i>	4,561E+08
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	<i>mm</i>	66,56
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	<i>%</i>	0,183%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	<i>kN</i>	2,08
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	<i>kNm</i>	41,50
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	<i>mm</i>	50
Spessore del laminato	t_f	<i>mm</i>	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,34
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	<i>MPa</i>	281,89
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	<i>%</i>	0,165%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	<i>kNm</i>	45,71
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione			Verificato

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,320	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	18,559	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	677,79	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	18,41	
Altezza utile	d	mm	320	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	700	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$\text{ctg}\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	38,76	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	952,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	86,88	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	35,72	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	122,61	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **10/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **700** cm e di altezza pari a **350** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **2** barre con diametro ϕ **16** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

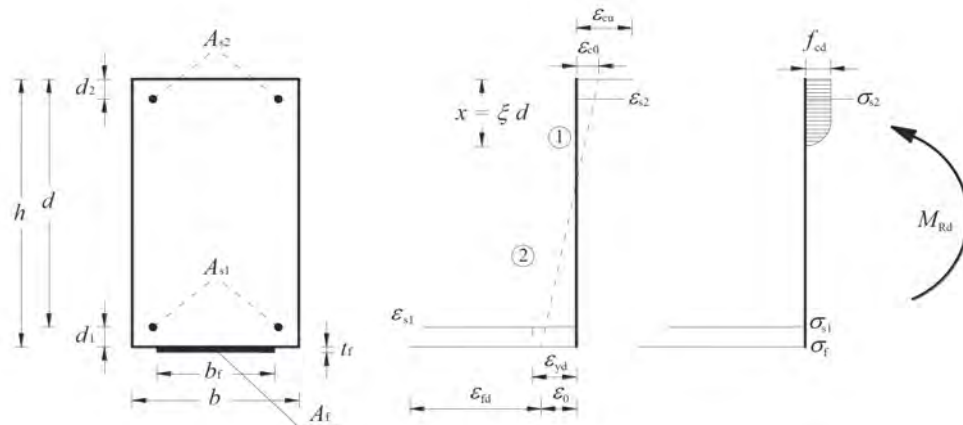


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

(7)

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x}$$

(9)

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

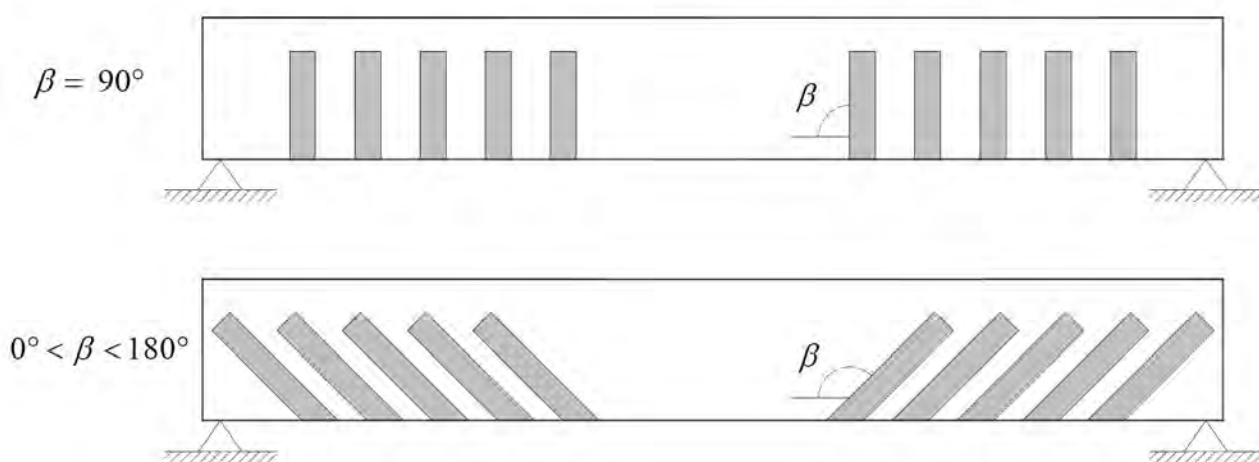


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

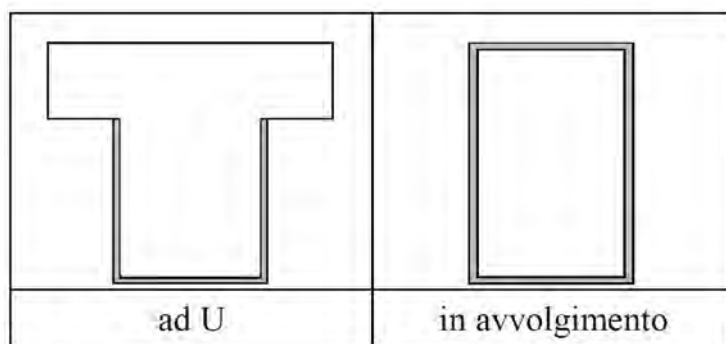


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

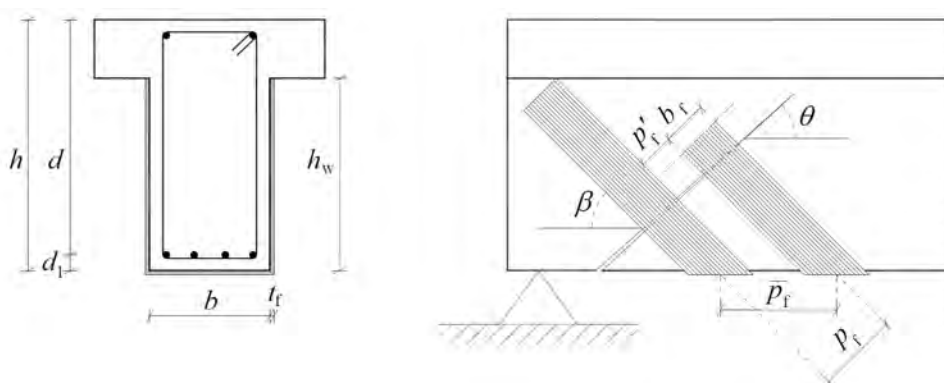


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

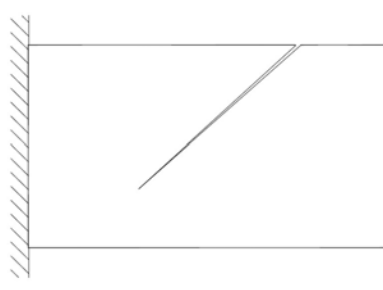


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\Phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\Phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	700	
Altezza	h	mm	350	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	402	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	<i>kN</i>	0,93
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	<i>kNm</i>	40,70
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	<i>mm</i>	43763,44
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	<i>mm</i>	43562,48
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	<i>mm³</i>	1,045E+04
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	<i>mm⁴</i>	4,561E+08
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	<i>mm</i>	66,32
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	<i>%</i>	0,180%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	<i>kN</i>	0,93
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	<i>kNm</i>	40,25
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	<i>mm</i>	50
Spessore del laminato	t_f	<i>mm</i>	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,34
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	<i>MPa</i>	281,89
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	<i>%</i>	0,165%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	<i>kNm</i>	45,40
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione			Verificato

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,320	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	18,559	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	677,79	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	18,20	
Altezza utile	d	mm	320	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	700	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$\text{ctg}\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	38,76	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	952,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	86,88	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	35,72	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	122,61	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **10/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **700** cm e di altezza pari a **400** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **4** barre con diametro ϕ **20** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

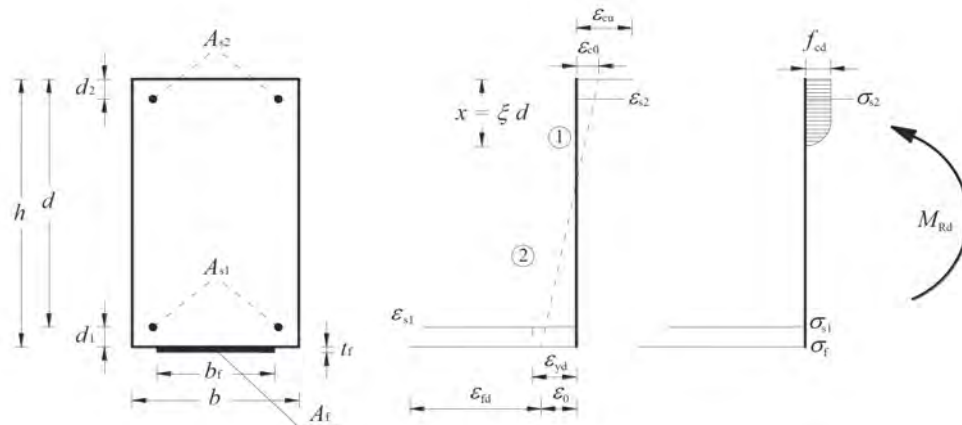


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

(7)

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad (9)$$

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

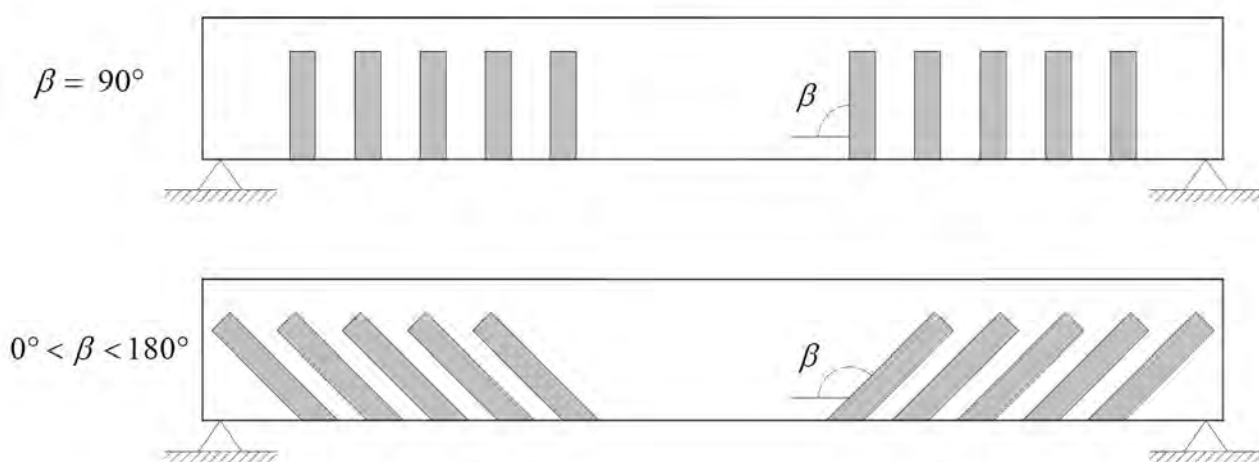


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

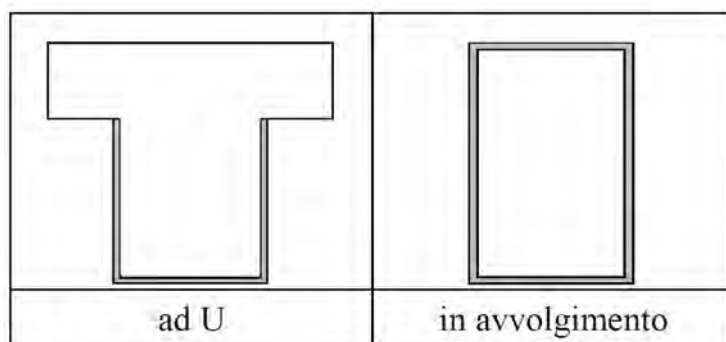


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

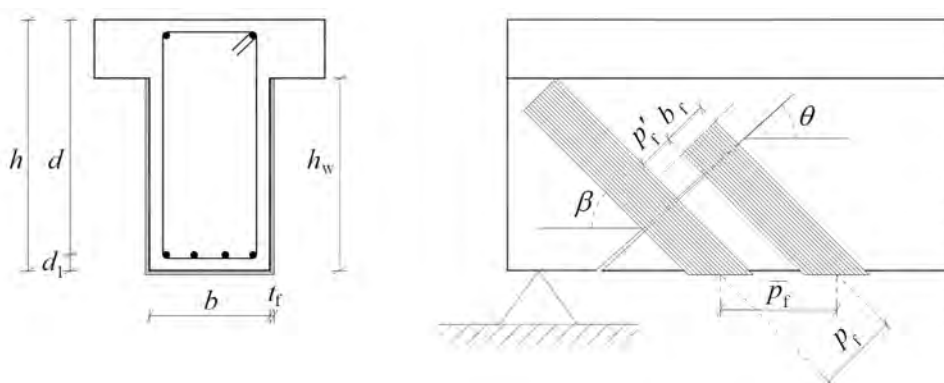


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{F_C} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

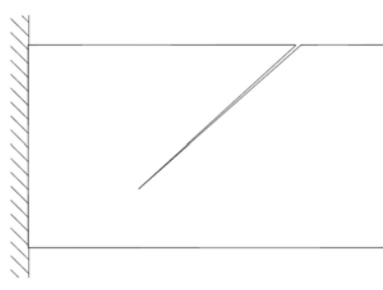


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	700	
Altezza	h	mm	400	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	1256	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	<i>kN</i>	46,23
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	<i>kNm</i>	87,30
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	<i>mm</i>	1888,38
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	<i>mm</i>	1260,38
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	<i>mm³</i>	1,147E+06
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	<i>mm⁴</i>	1,592E+09
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	<i>mm</i>	127,73
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	<i>%</i>	0,078%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	<i>kN</i>	46,23
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	<i>kNm</i>	35,90
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	<i>mm</i>	50
Spessore del laminato	t_f	<i>mm</i>	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,34
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	<i>MPa</i>	281,89
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	<i>%</i>	0,165%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	<i>kNm</i>	158,66
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione	Verificato		

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,320	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	18,559	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	677,79	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	20,53	
Altezza utile	d	mm	370	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	700	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$\text{ctg}\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	38,76	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	1100,75	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	100,46	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	41,31	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	141,76	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **11/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **300** cm e di altezza pari a **500** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **2** barre con diametro ϕ **16** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

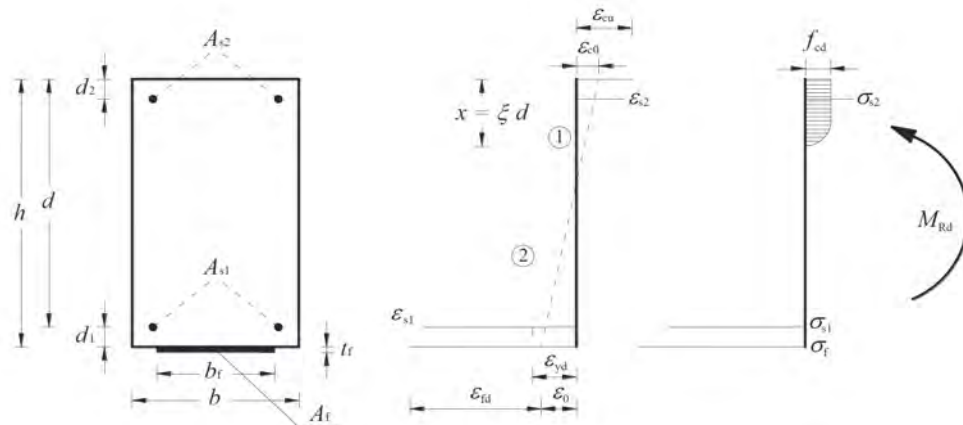


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

(7)

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x-d_2}{x}$$

(9)

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d-x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

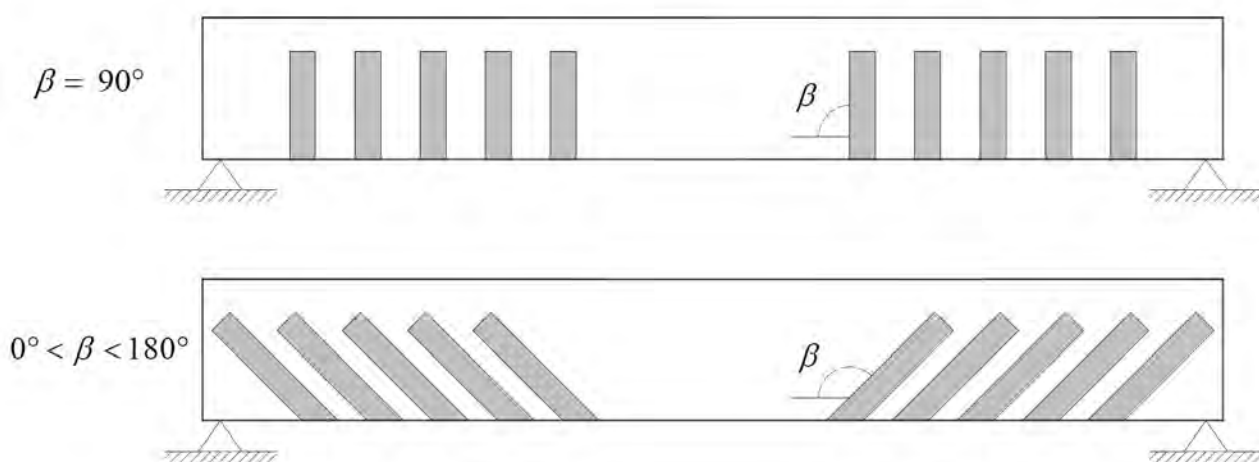


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

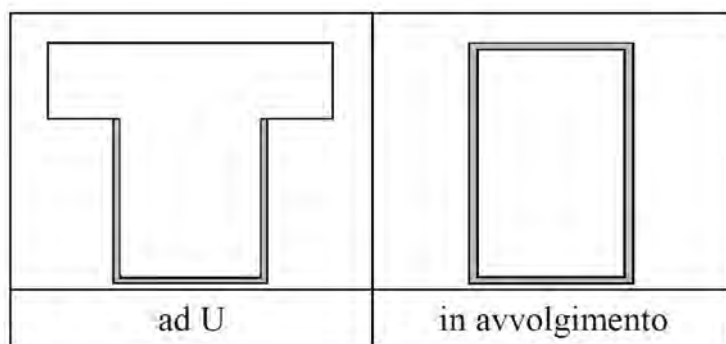


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

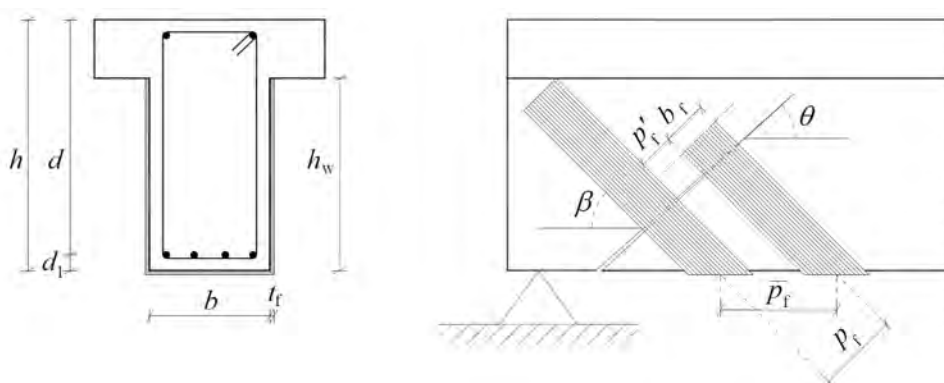


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{F_C} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

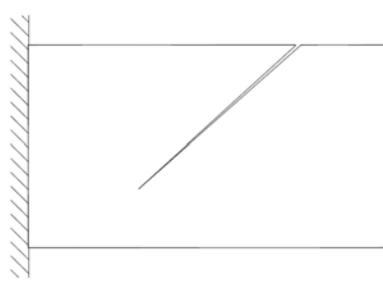


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\Phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\Phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	300	
Altezza	h	mm	500	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	402	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	<i>kN</i>	24,80
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	<i>kNm</i>	49,51
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	<i>mm</i>	1996,37
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	<i>mm</i>	1795,41
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	<i>mm³</i>	4,761E+05
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	<i>mm⁴</i>	9,165E+08
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	<i>mm</i>	129,77
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	<i>%</i>	0,138%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	<i>kN</i>	24,80
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	<i>kNm</i>	61,81
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	<i>mm</i>	50
Spessore del laminato	t_f	<i>mm</i>	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,25
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	<i>MPa</i>	272,48
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	<i>%</i>	0,159%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	<i>kNm</i>	75,59
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione			Verificato

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,168	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	17,340	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	655,17	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	37,11	
Altezza utile	d	mm	470	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	300	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$ctg\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	37,47	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	599,25	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	127,61	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	50,72	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	178,33	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **09/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **900** cm e di altezza pari a **350** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **4** barre con diametro ϕ **24** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	30,12 MPa
f_{cm}	25,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	17,71 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

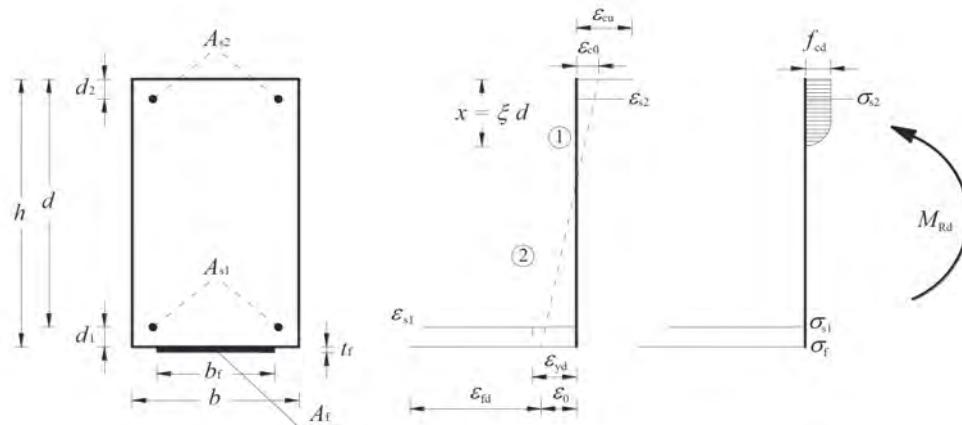


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

(7)

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad (9)$$

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

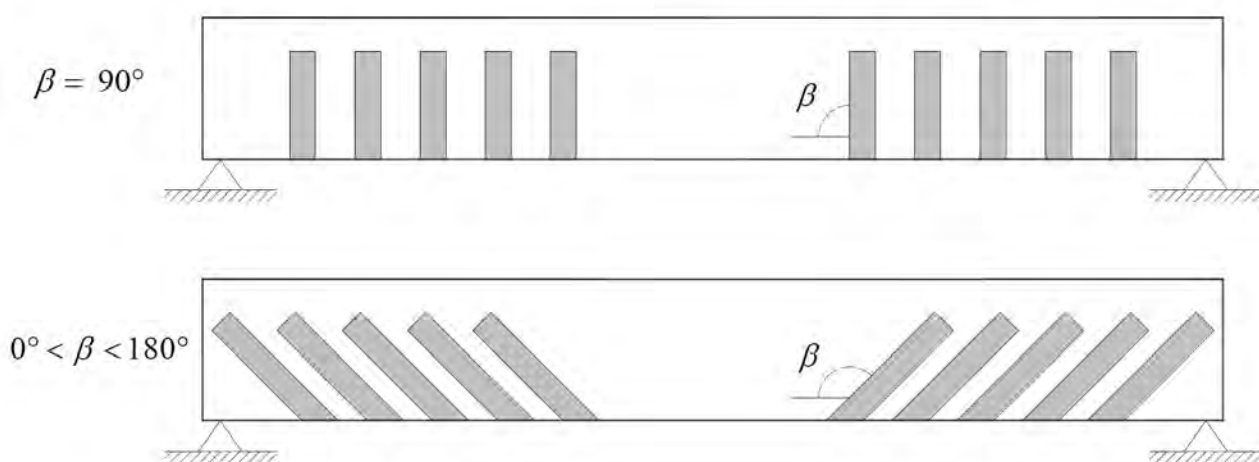


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

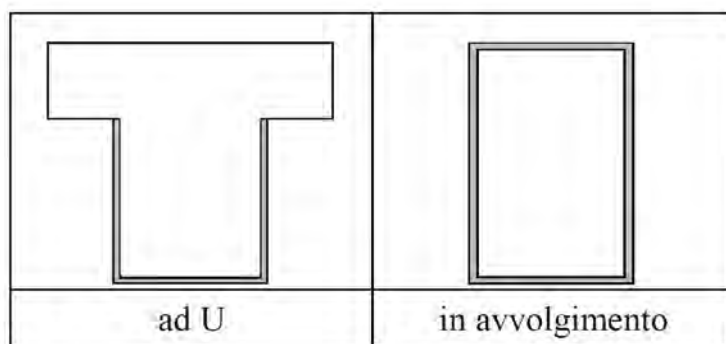


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

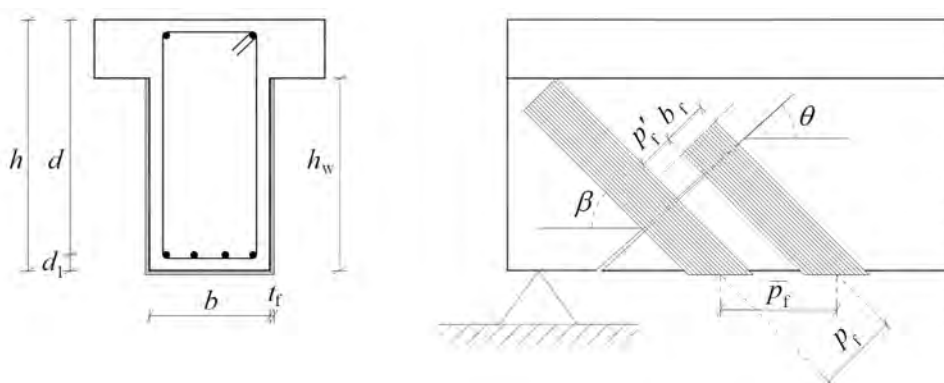


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{F_C} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

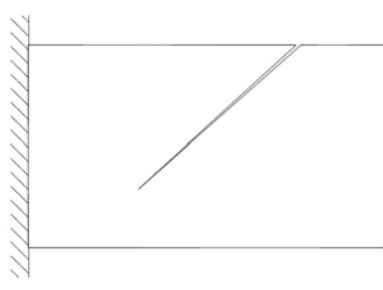


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin\beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin\beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin\theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	900	
Altezza	h	mm	350	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	1809	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	25,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,98	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	17,71	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	<i>kN</i>	4,70
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	<i>kNm</i>	33,15
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	<i>mm</i>	7053,19
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	<i>mm</i>	6148,87
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	<i>mm³</i>	2,548E+05
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	<i>mm⁴</i>	1,596E+09
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	<i>mm</i>	113,96
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	<i>%</i>	0,031%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	<i>kN</i>	4,70
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	<i>kNm</i>	32,35
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	<i>mm</i>	50
Spessore del laminato	t_f	<i>mm</i>	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,36
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	<i>MPa</i>	317,71
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	<i>%</i>	0,186%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	<i>kNm</i>	178,21
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione			Verificato

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,947	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	23,575	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	763,92	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	11,70	
Altezza utile	d	mm	320	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	900	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	11,81	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$\text{ctg}\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	43,69	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	1530,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	86,88	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	40,26	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	127,15	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **11/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **300** cm e di altezza pari a **550** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **3** barre con diametro ϕ **16** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

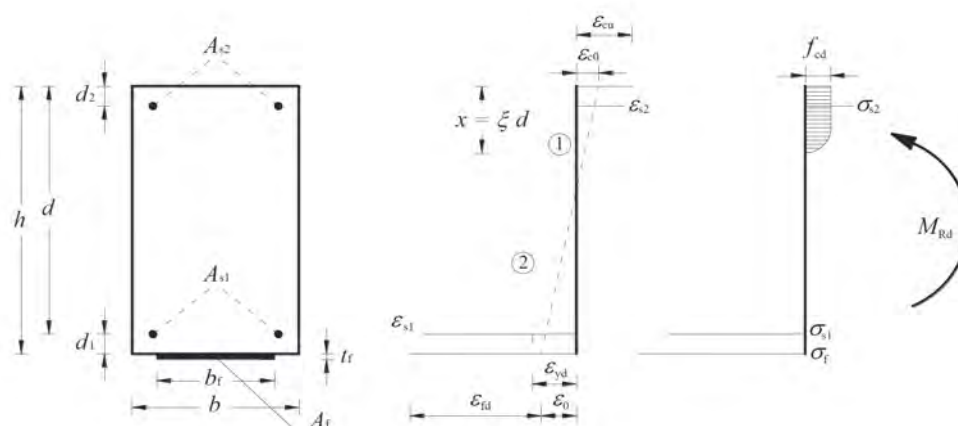


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ε_{fd} è fornita dalla **(2)**; ε_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ε_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_f}{y} \cdot (h - x) - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fd}$$

(7)

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\mathfrak{E} = \mathfrak{E}_{\text{eff}}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x-d_2}{x} \quad (9)$$

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d-x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot \mathbf{b} \cdot \mathbf{x} \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

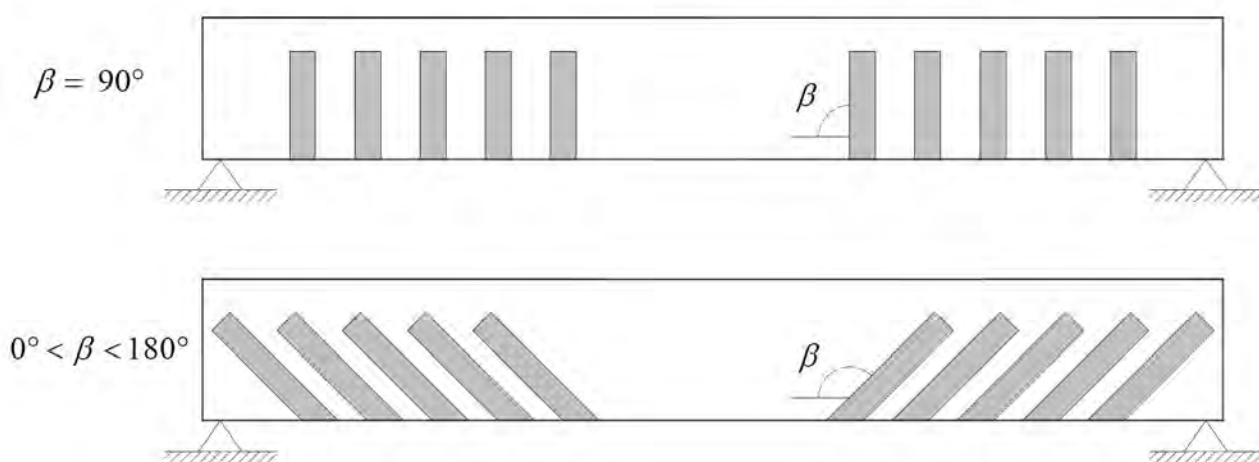


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

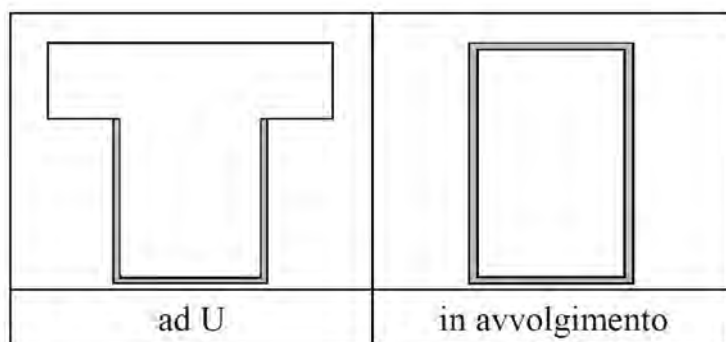


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

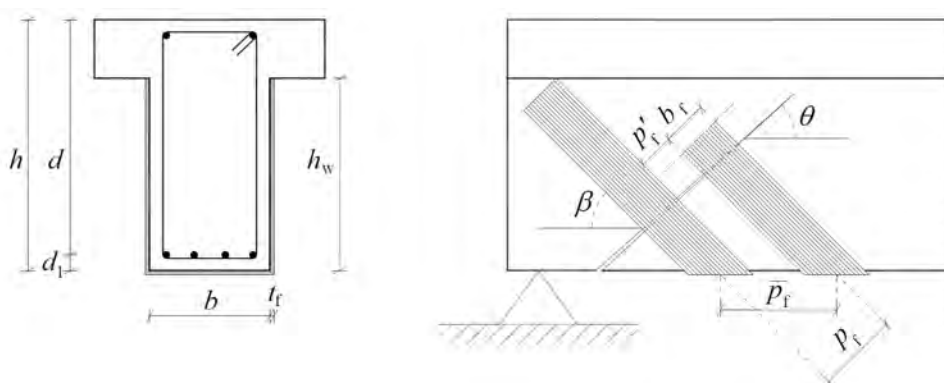


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{F_C} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

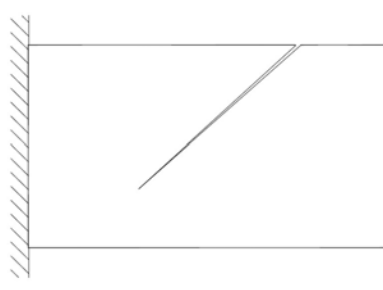


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin\beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin\beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin\theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	300	
Altezza	h	mm	550	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	603	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	<i>kN</i>	74,25
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	<i>kNm</i>	20,40
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	<i>mm</i>	274,75
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	<i>mm</i>	-26,69
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	<i>mm³</i>	1,146E+07
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	<i>mm⁴</i>	3,126E+09
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	<i>mm</i>	299,47
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	<i>%</i>	0,012%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	<i>kN</i>	74,25
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	<i>kNm</i>	8,50
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	<i>mm</i>	50
Spessore del laminato	t_f	<i>mm</i>	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,25
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	<i>MPa</i>	272,48
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	<i>%</i>	0,159%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	<i>kNm</i>	136,44
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione			Verificato

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,168	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	17,340	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	655,17	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	29,10	
Altezza utile	d	mm	520	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	300	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$\text{ctg}\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	37,47	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	663,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	141,18	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	56,11	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	197,30	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **11/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , particella n. .

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **700** cm e di altezza pari a **350** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **6** barre con diametro ϕ **16** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

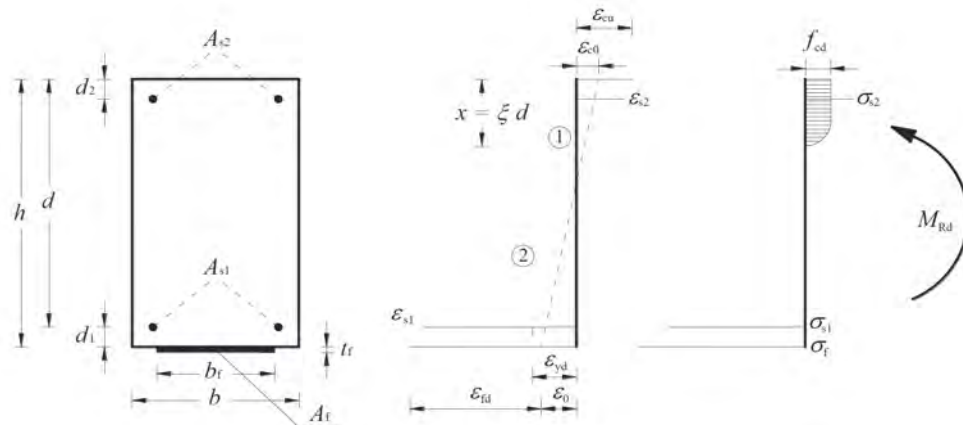


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

(7)

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad (9)$$

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

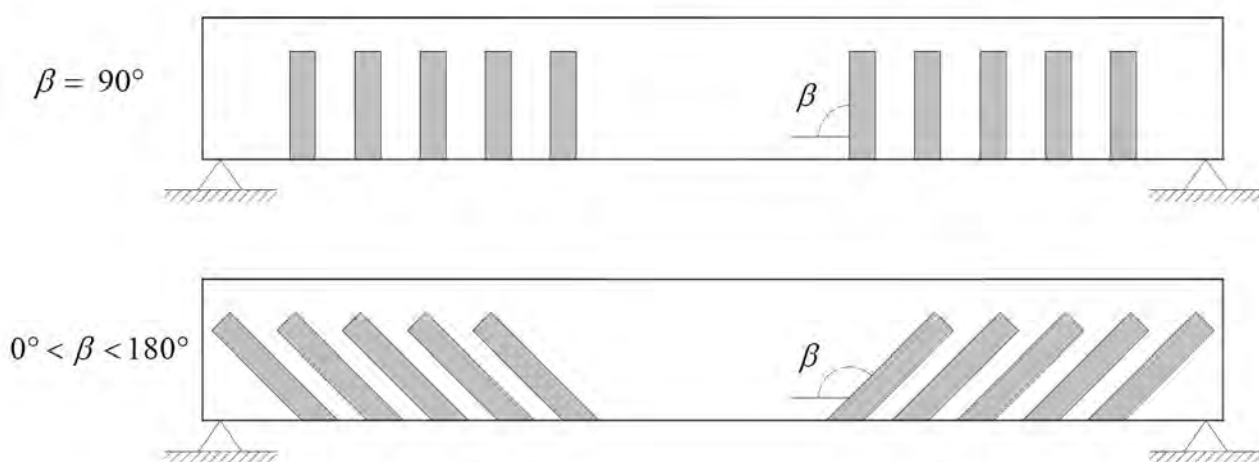


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

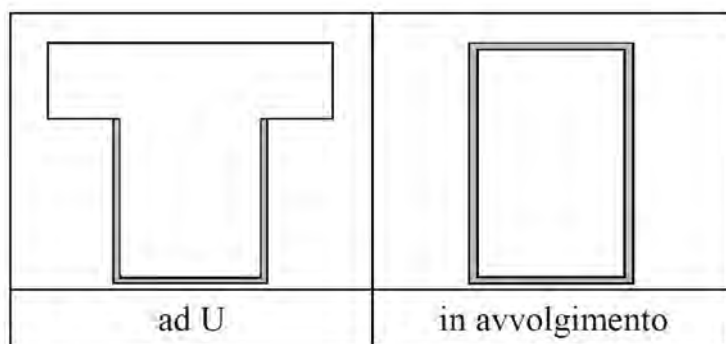


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Mörsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

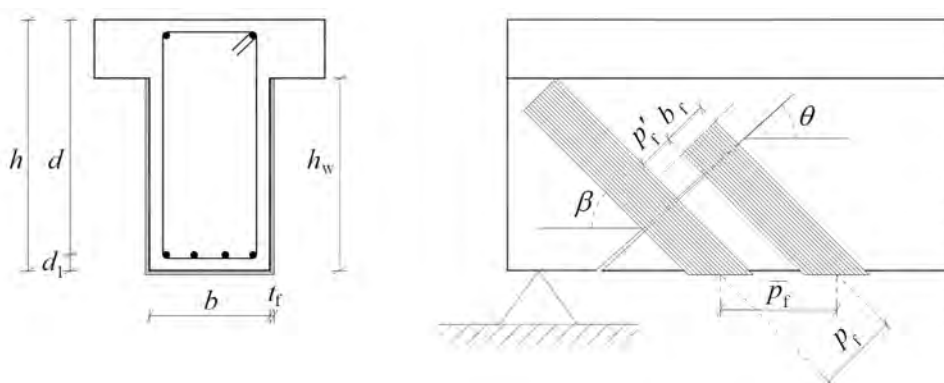


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

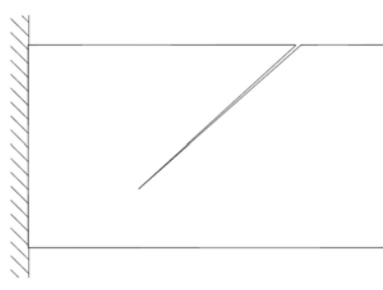


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	700	
Altezza	h	mm	350	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	1206	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	<i>kN</i>	19,10
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	<i>kNm</i>	43,05
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	<i>mm</i>	2253,93
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	<i>mm</i>	1651,05
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	<i>mm³</i>	6,298E+05
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	<i>mm⁴</i>	1,110E+09
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	<i>mm</i>	112,00
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	<i>%</i>	0,052%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	<i>kN</i>	19,10
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	<i>kNm</i>	47,84
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	<i>mm</i>	50
Spessore del laminato	t_f	<i>mm</i>	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,34
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	<i>MPa</i>	281,89
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	<i>%</i>	0,165%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	<i>kNm</i>	123,98
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione			Verificato

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,320	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	18,559	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	677,79	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	14,45	
Altezza utile	d	mm	320	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	700	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$\text{ctg}\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	38,76	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	952,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	86,88	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	35,72	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	122,61	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **11/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **1200** cm e di altezza pari a **350** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **8** barre con diametro ϕ **16** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

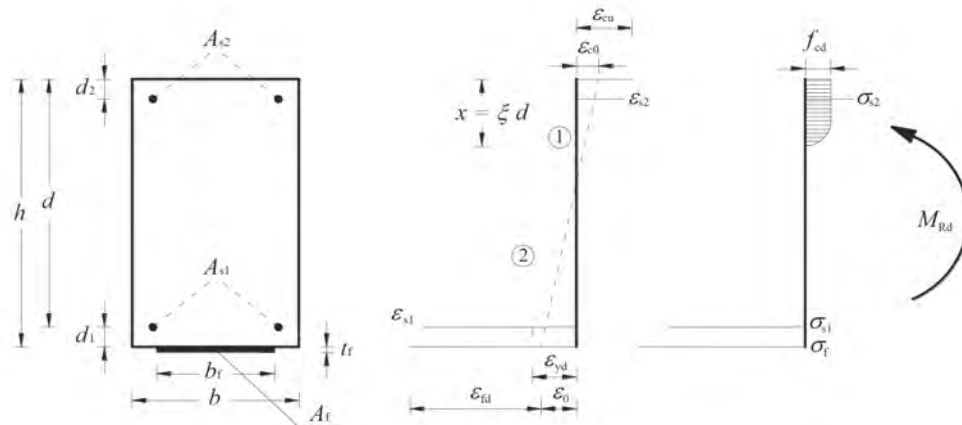


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

(7)

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x}$$

(9)

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

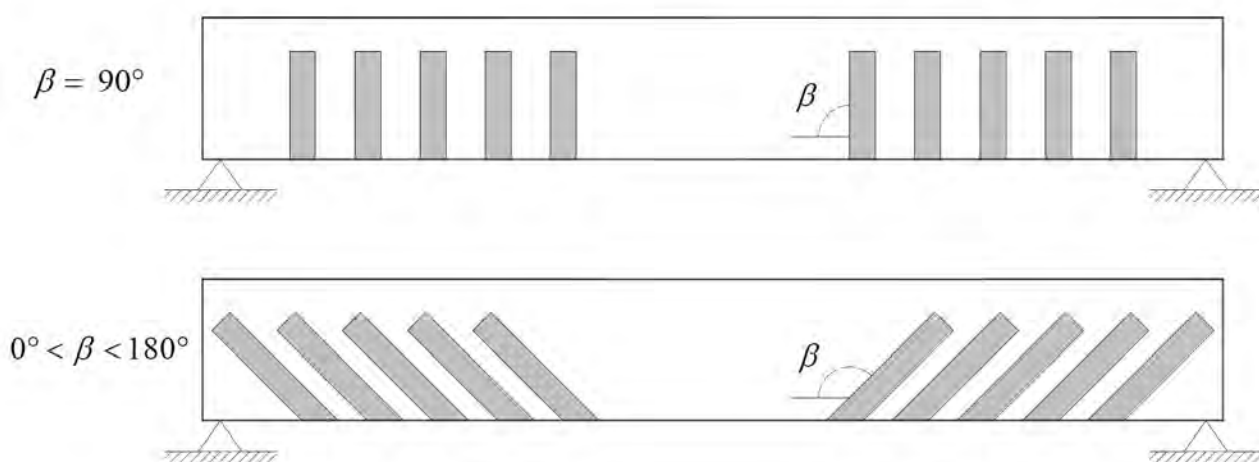


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

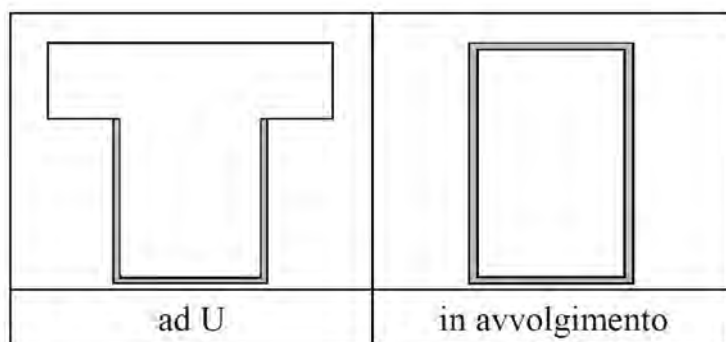


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

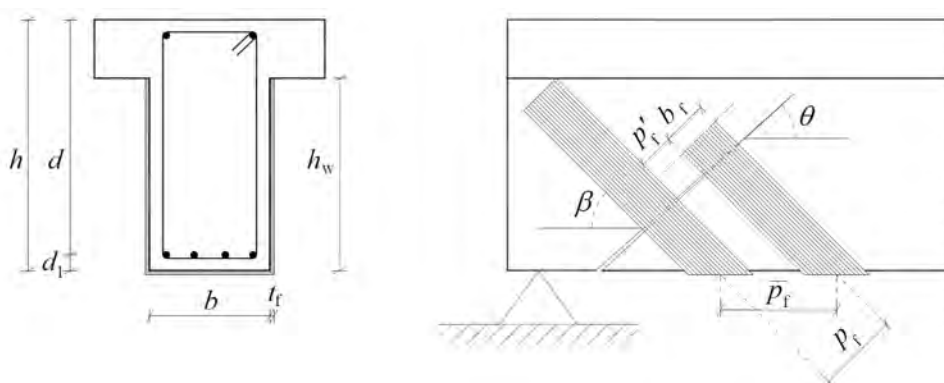


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{F_C} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

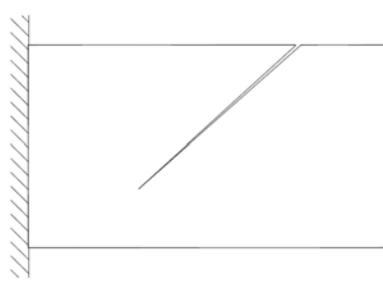


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f/b}{1 + b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	1200	
Altezza	h	mm	350	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	1608	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	<i>kN</i>	4,19
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	<i>kNm</i>	37,52
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	<i>mm</i>	8954,65
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	<i>mm</i>	8150,81
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	<i>mm³</i>	1,896E+05
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	<i>mm⁴</i>	1,564E+09
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	<i>mm</i>	96,44
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	<i>%</i>	0,040%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	<i>kN</i>	4,19
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	<i>kNm</i>	37,00
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	<i>mm</i>	50
Spessore del laminato	t_f	<i>mm</i>	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,37
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	<i>MPa</i>	284,98
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	<i>%</i>	0,167%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	<i>kNm</i>	160,07
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione	Verificato		

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,371	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	18,967	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	685,20	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	29,80	
Altezza utile	d	mm	320	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	1200	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$\text{ctg}\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	39,19	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	1632,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	86,88	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	36,12	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	123,00	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **11/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **900** cm e di altezza pari a **350** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **5** barre con diametro ϕ **16** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

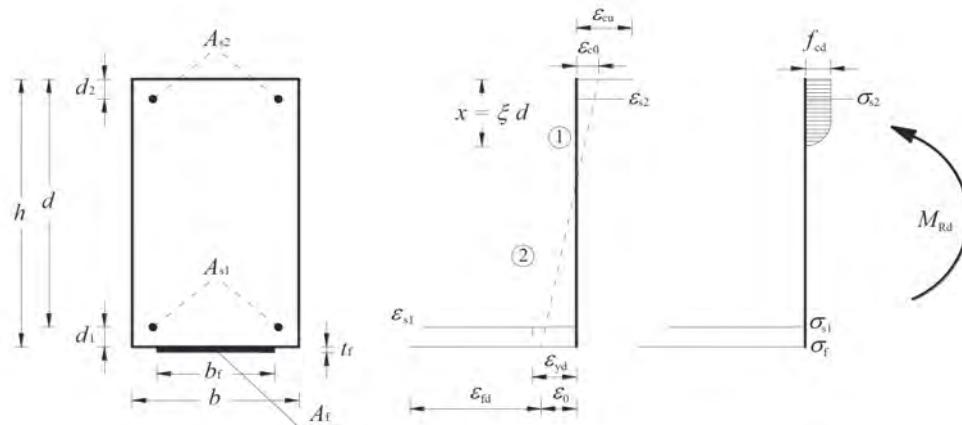


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP
$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

(7)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$

(8)

- Acciaio in compressione
$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x}$$

(9)

- Acciaio in trazione
$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

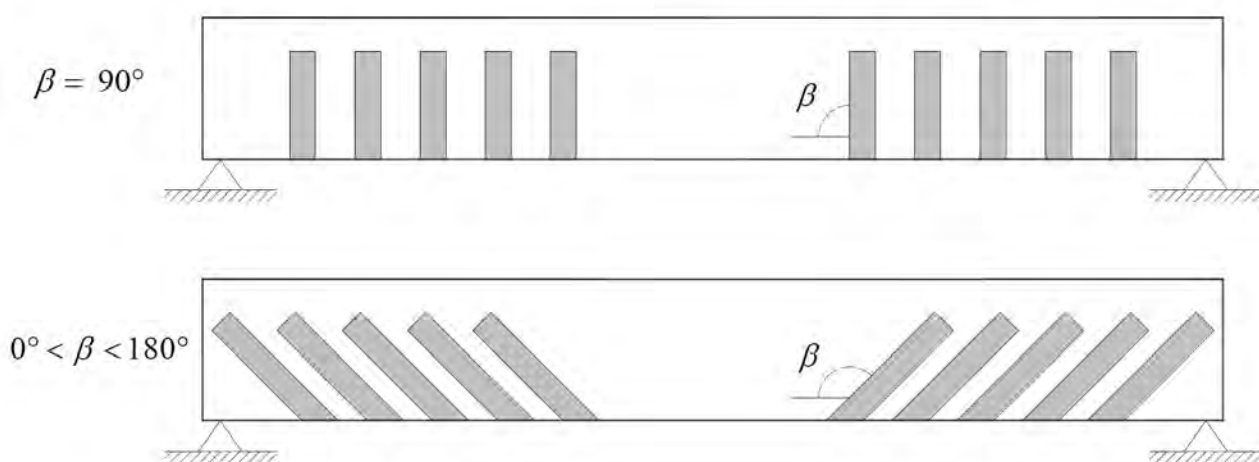


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

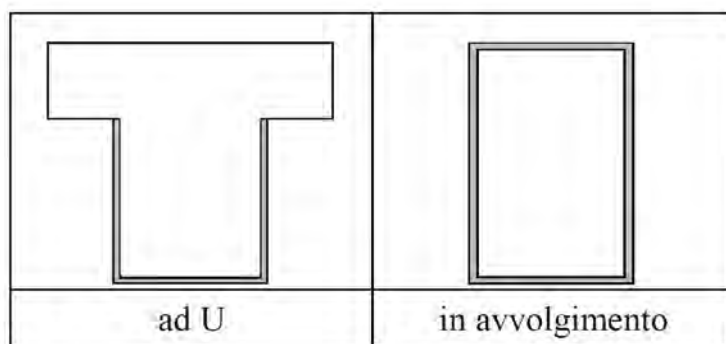


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

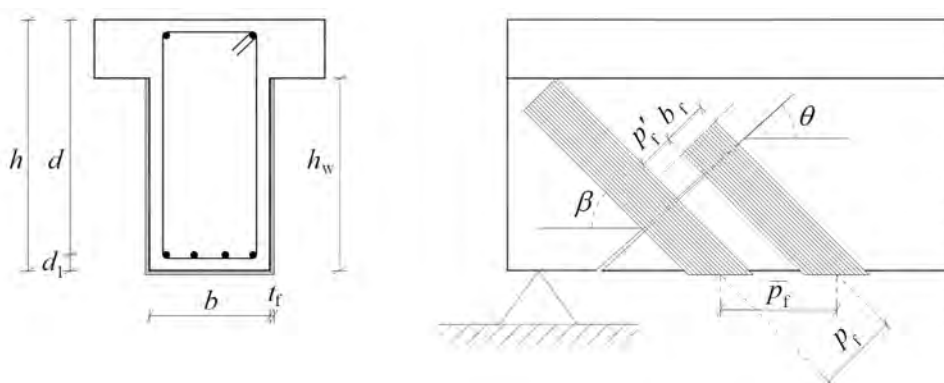


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{F_C} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

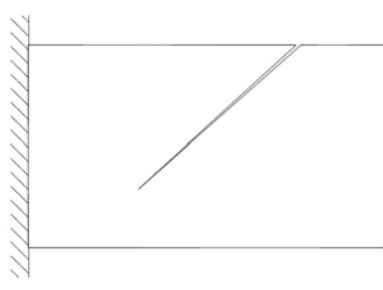


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	900	
Altezza	h	mm	350	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	1005	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	kN	1,93
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	kNm	22,30
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	mm	11554,40
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	mm	11052,00
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	mm^3	9,118E+04
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	mm^4	1,016E+09
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	mm	89,08
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	$\%$	0,039%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	kN	1,93
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	kNm	22,42
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	mm	50
Spessore del laminato	t_f	mm	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,36
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	MPa	283,53
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	$\%$	0,166%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	kNm	102,64
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione	Verificato		

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,347	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	18,775	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	681,72	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	12,10	
Altezza utile	d	mm	320	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	900	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$ctg\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	38,99	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	1224,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	86,88	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	35,93	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	122,81	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **11/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **300** cm e di altezza pari a **350** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **2** barre con diametro ϕ **16** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

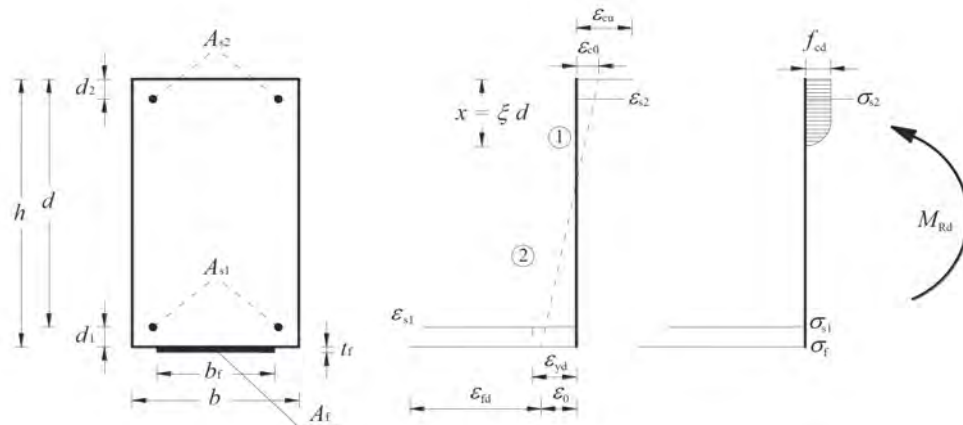


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

(7)

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad (9)$$

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

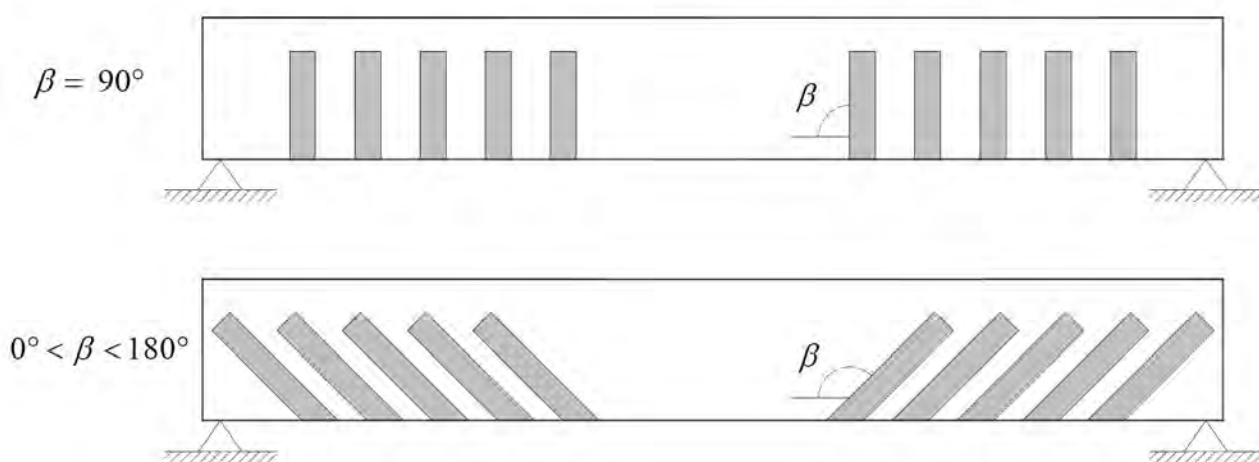


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

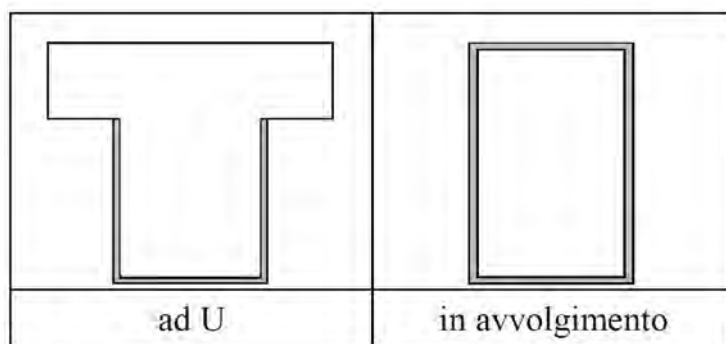


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

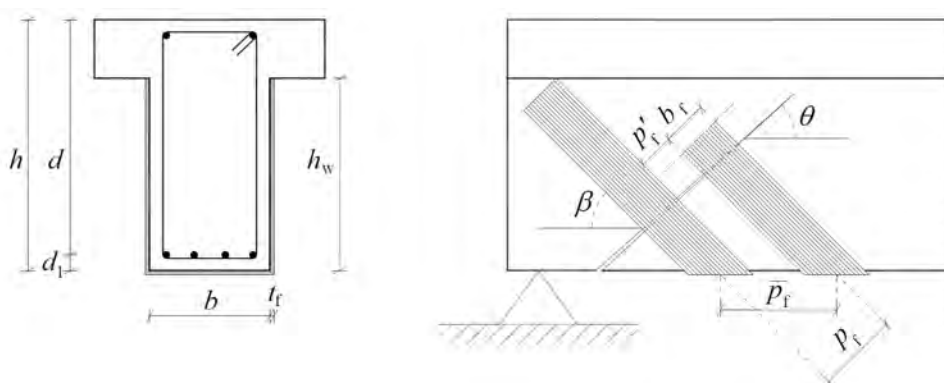


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

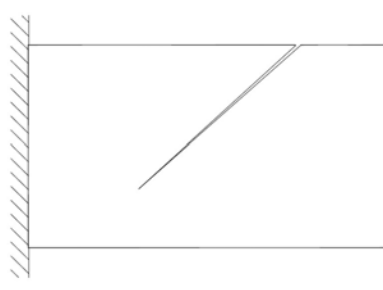


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\Phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\Phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	300	
Altezza	h	mm	350	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	402	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	kN	22,06
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	kNm	19,34
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	mm	876,70
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	mm	675,74
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	mm^3	5,071E+05
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	mm^4	3,979E+08
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	mm	108,90
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	$\%$	0,075%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	kN	22,07
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	kNm	16,81
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	mm	50
Spessore del laminato	t_f	mm	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,25
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	MPa	272,48
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	$\%$	0,159%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	kNm	49,79
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione	Verificato		

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,168	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	17,340	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	655,17	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	5,41	
Altezza utile	d	mm	320	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	300	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$ctg\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	37,47	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	408,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	86,88	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	34,53	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	121,41	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **11/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , particella n. .

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **300** cm e di altezza pari a **350** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **2** barre con diametro ϕ **16** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa . Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

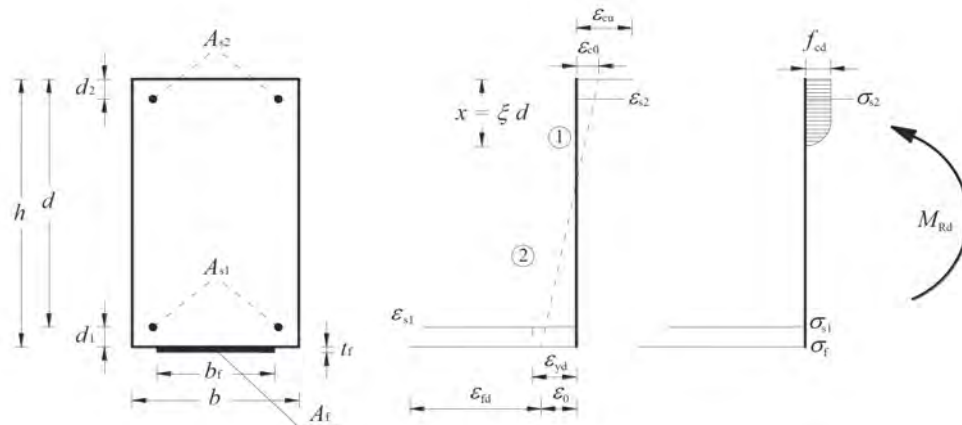


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

(7)

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad (9)$$

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

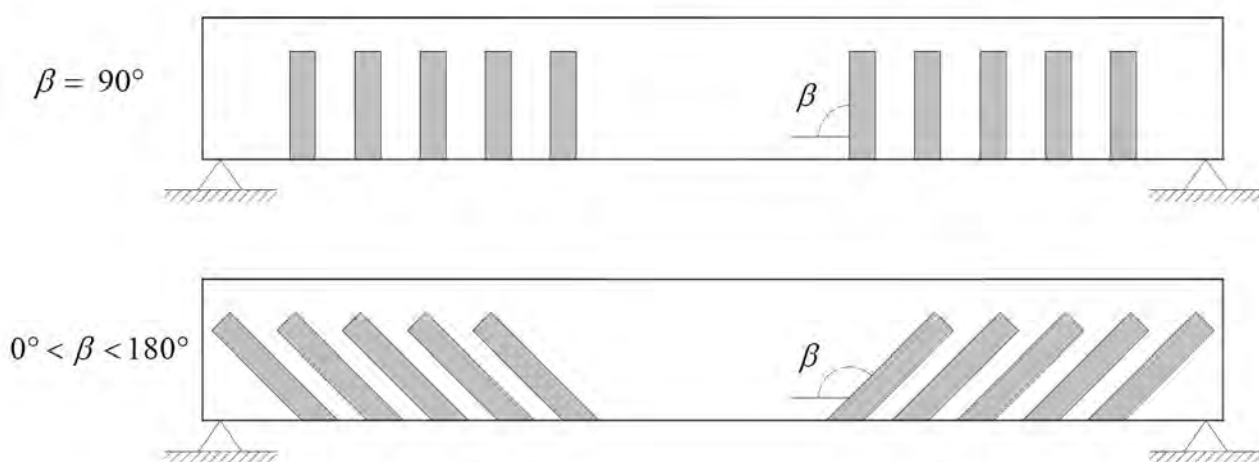


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

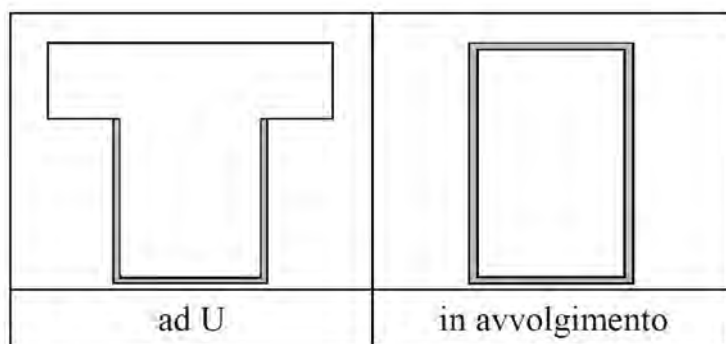


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

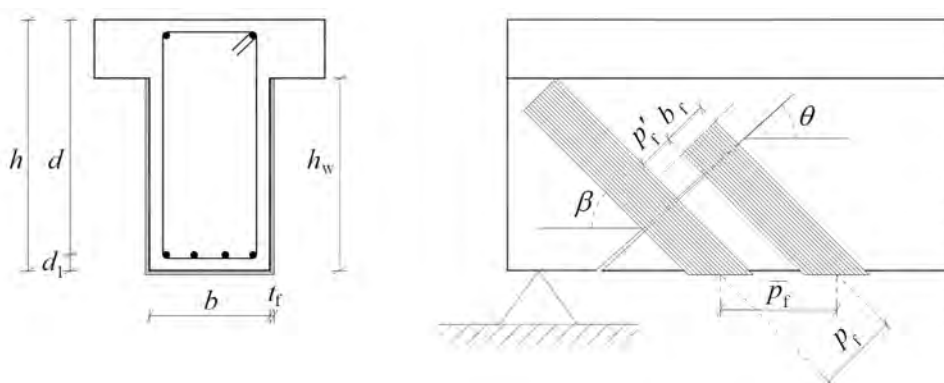


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{F_C} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

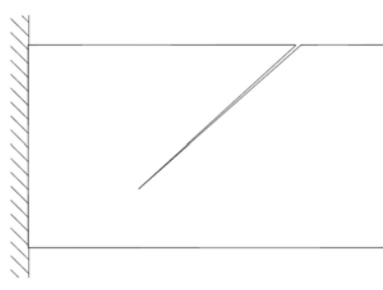


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\Phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\Phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	300	
Altezza	h	mm	350	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	402	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	kN	21,50
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	kNm	18,71
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	mm	870,23
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	mm	669,27
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	mm^3	5,114E+05
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	mm^4	3,980E+08
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	mm	109,01
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	%	0,072%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	kN	21,50
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	kNm	16,25
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	mm	50
Spessore del laminato	t_f	mm	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,25
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	MPa	272,48
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	%	0,159%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	kNm	49,66
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione	Verificato		

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,168	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	17,340	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	655,17	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	5,22	
Altezza utile	d	mm	320	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	300	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$\text{ctg}\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	37,47	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	408,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	86,88	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	34,53	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	121,41	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **11/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , particella n. .

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **300** cm e di altezza pari a **550** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **4** barre con diametro ϕ **16** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

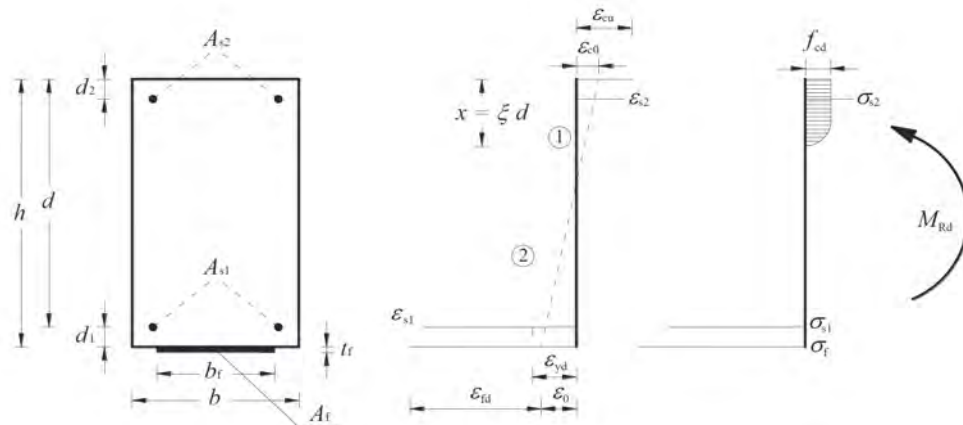


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

(7)

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad (9)$$

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

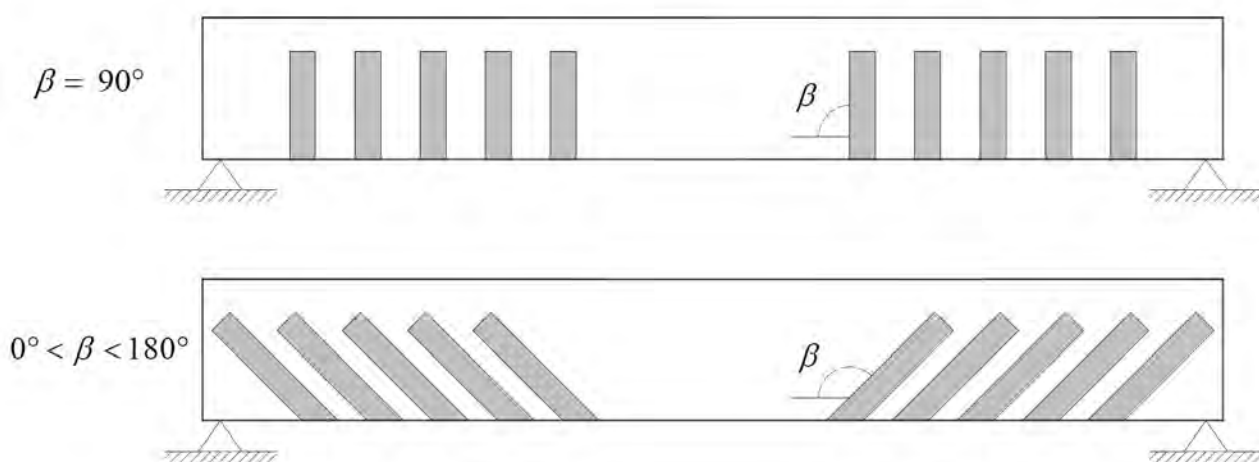


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

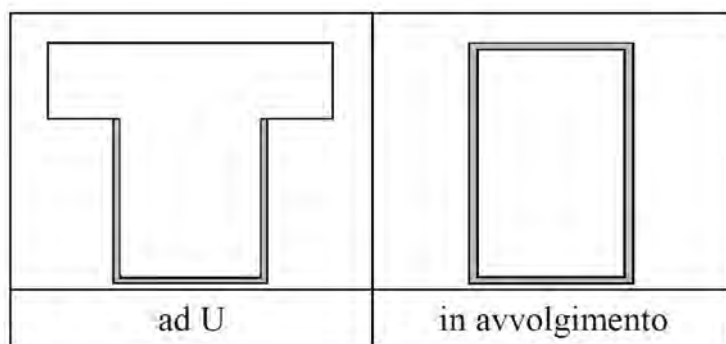


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

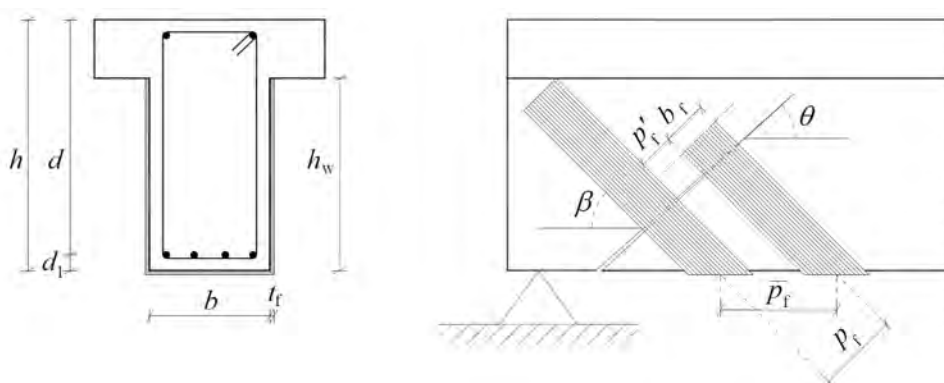


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

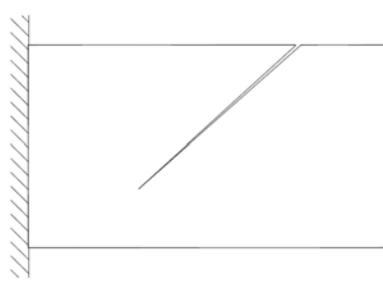


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\Phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\Phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	300	
Altezza	h	mm	550	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	804	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	kN	1,33
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	kNm	0,94
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	mm	706,77
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	mm	304,85
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	mm^3	4,141E+06
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	mm^4	2,199E+09
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	mm	226,28
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	$\%$	0,001%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	kN	0,70
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	kNm	0,19
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	mm	50
Spessore del laminato	t_f	mm	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,25
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	MPa	272,48
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	$\%$	0,159%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	kNm	131,55
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione			Verificato

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,168	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	17,340	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	655,17	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	0,33	
Altezza utile	d	mm	520	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	300	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$ctg\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	37,47	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	663,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	141,18	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	56,11	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	197,30	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **09/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R03**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , particella n. .

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **1200** cm e di altezza pari a **350** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **7** barre con diametro ϕ **16** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	30,12 MPa
f_{cm}	25,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	17,71 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Con riferimento alla situazione esemplificativa rappresentata in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$

(5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

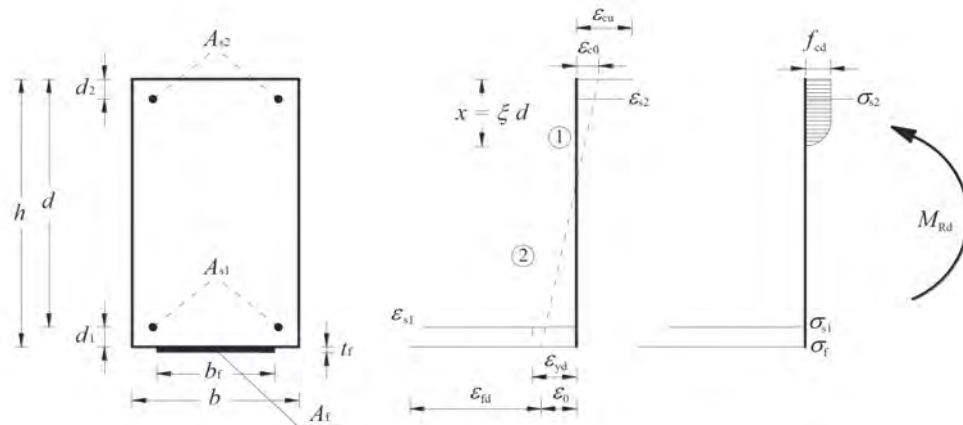


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

(7)

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad (9)$$

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

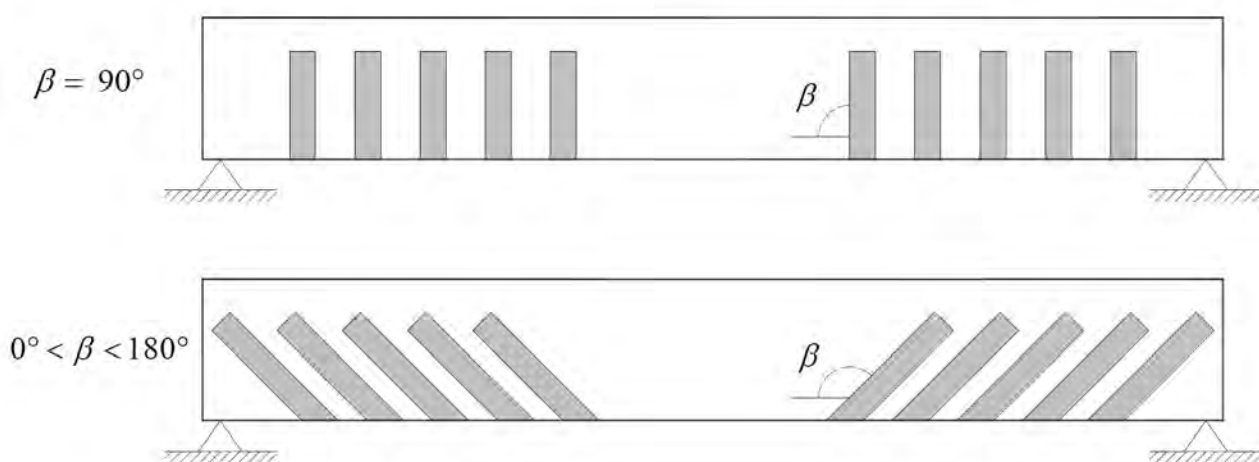


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

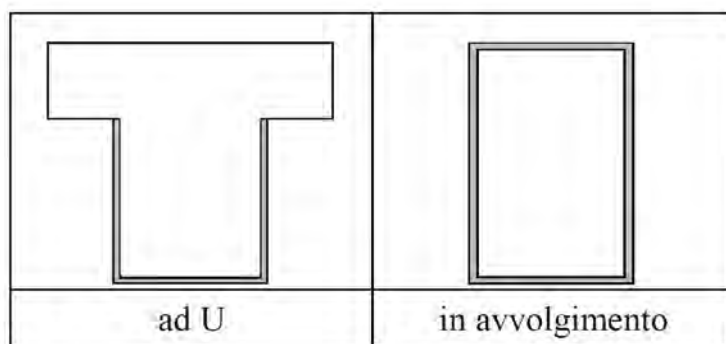


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

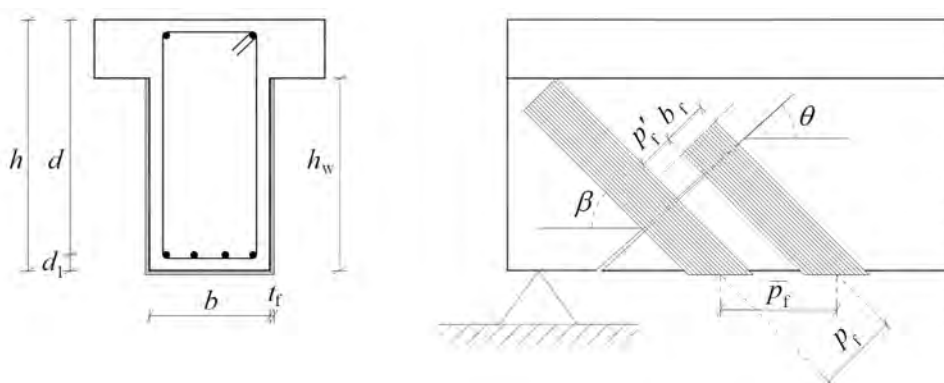


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

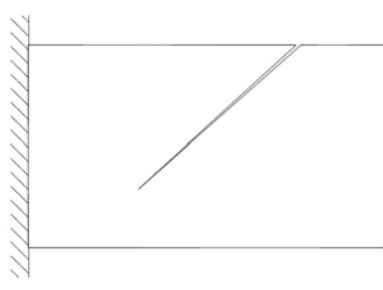


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\Phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\Phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	1200	
Altezza	h	mm	350	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	1407	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	25,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,98	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	17,71	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	kN	6,45
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	kNm	17,45
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	mm	2705,43
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	mm	2002,07
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	mm^3	6,730E+05
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	mm^4	1,411E+09
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	mm	95,04
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	%	0,017%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	kN	6,45
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	kNm	18,30
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	mm	50
Spessore del laminato	t_f	mm	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,37
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	MPa	319,34
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	%	0,187%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	kNm	144,35
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione	Verificato		

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,977	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	23,816	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	767,82	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	14,30	
Altezza utile	d	mm	320	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	1200	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	11,81	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$ctg\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	43,91	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	2040,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	86,88	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	40,47	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	127,35	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **11/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , particella n. .

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **900** cm e di altezza pari a **350** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **5** barre con diametro ϕ **16** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

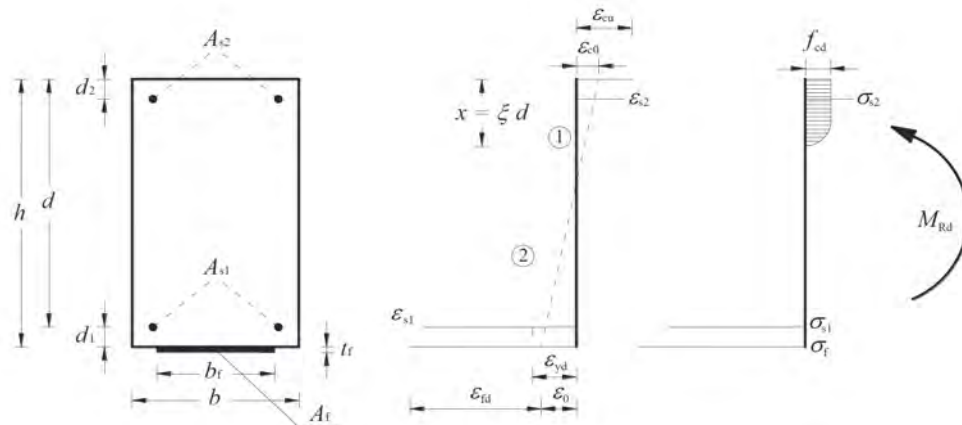


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

(7)

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad (9)$$

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

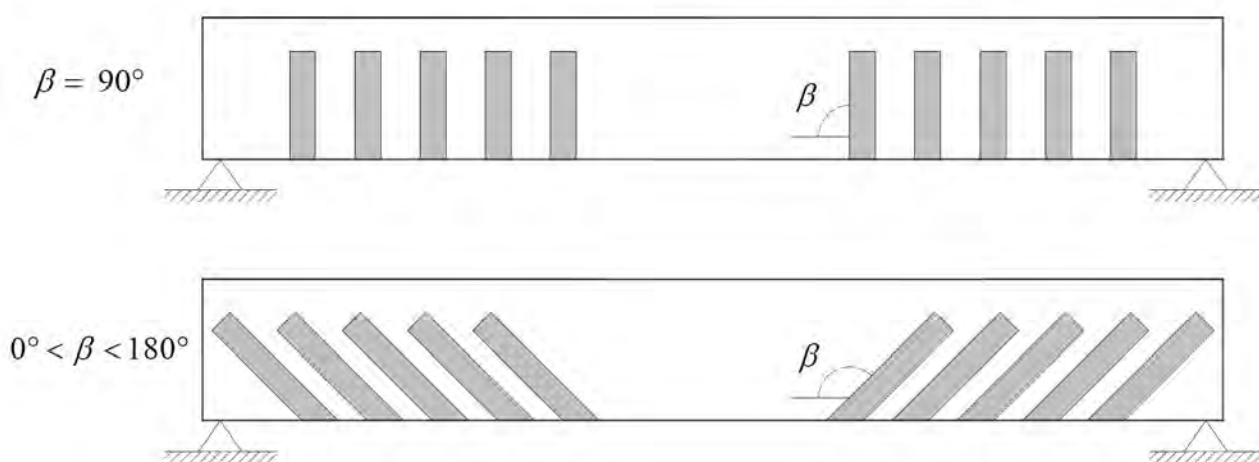


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

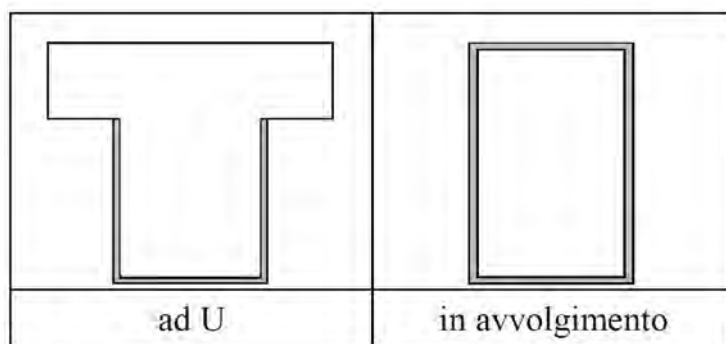


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

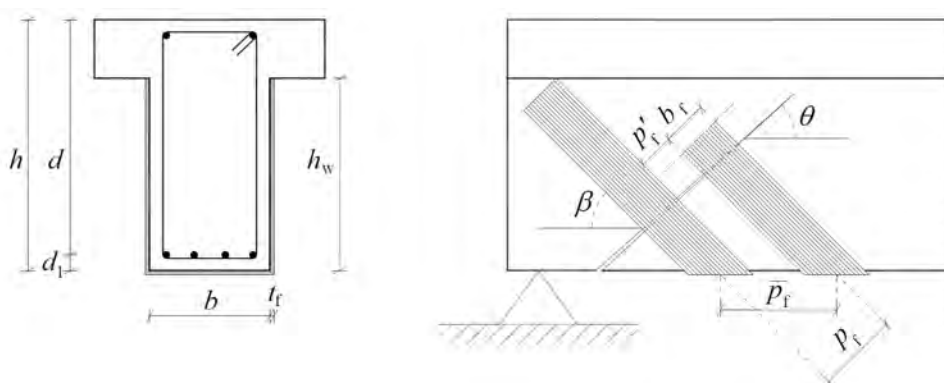


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

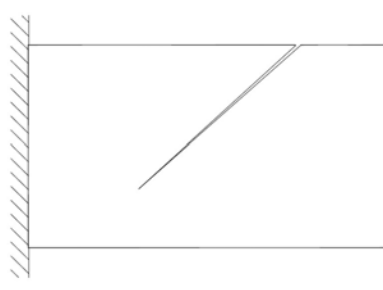


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\Phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\Phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	900	
Altezza	h	mm	350	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	1005	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	kN	4,02
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	kNm	10,30
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	mm	2562,19
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	mm	2059,79
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	mm^3	4,729E+05
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	mm^4	1,018E+09
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	mm	93,01
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	%	0,016%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	kN	4,02
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	kNm	10,41
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	mm	50
Spessore del laminato	t_f	mm	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,36
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	MPa	283,53
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	%	0,166%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	kNm	103,28
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione	Verificato		

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,347	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	18,775	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	681,72	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	5,60	
Altezza utile	d	mm	320	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	900	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$\text{ctg}\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	38,99	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	1224,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	86,88	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	35,93	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	122,81	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **09/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R02**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **300** cm e di altezza pari a **350** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **2** barre con diametro ϕ **16** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	30,12 MPa
f_{cm}	25,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	17,71 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa . Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Con riferimento alla situazione esemplificativa rappresentata in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$

(5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

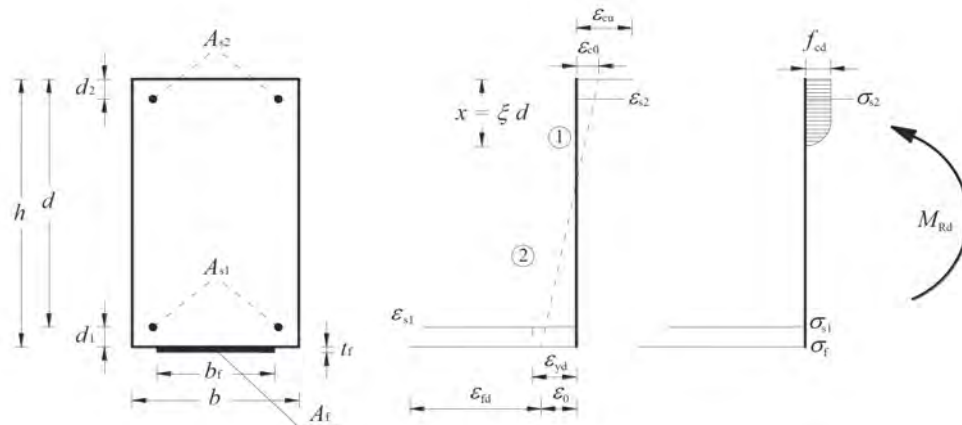


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP
$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

(7)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$

(8)

- Acciaio in compressione
$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x}$$

(9)

- Acciaio in trazione
$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

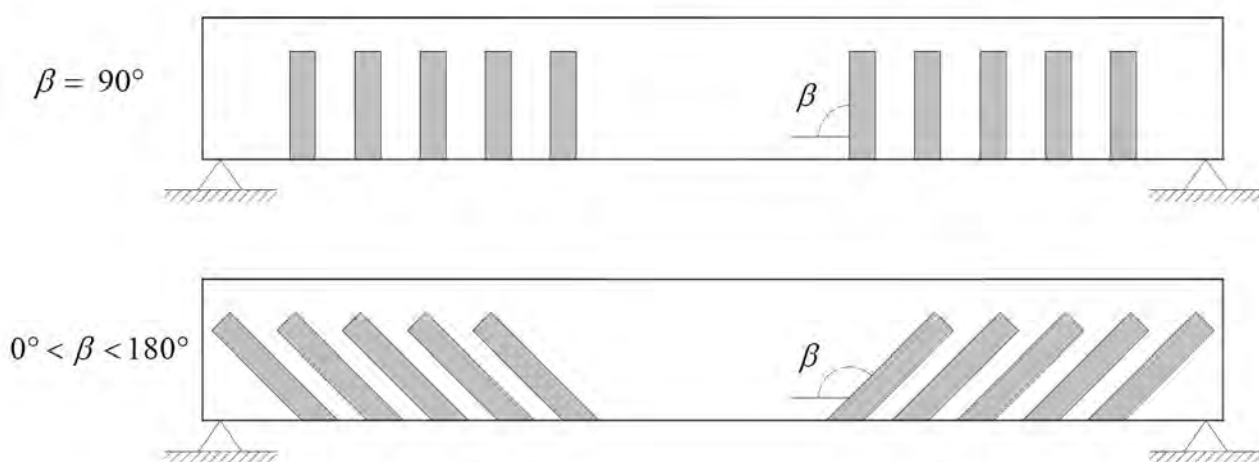


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

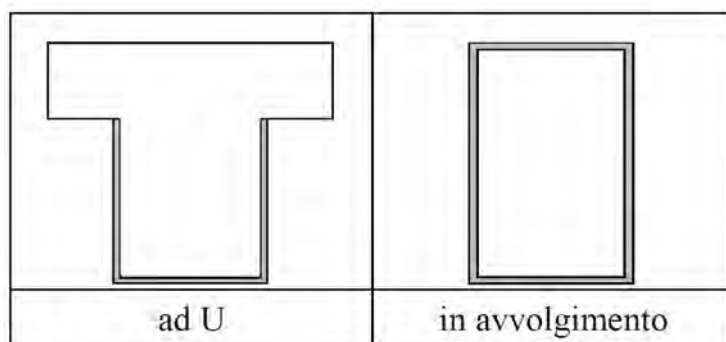


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

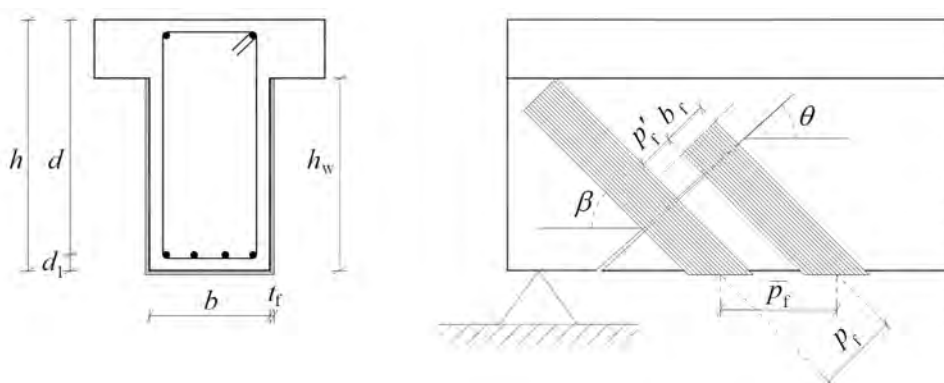


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

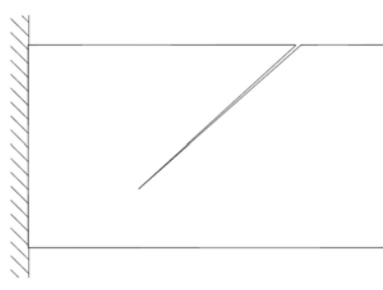


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\Phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\Phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	300	
Altezza	h	mm	350	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	402	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	25,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,98	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	17,71	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	kN	6,85
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	kNm	11,85
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	mm	1729,93
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	mm	1528,97
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	mm^3	2,407E+05
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	mm^4	3,926E+08
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	mm	101,82
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	$\%$	0,050%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	kN	6,85
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	kNm	12,70
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	mm	50
Spessore del laminato	t_f	mm	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,25
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	MPa	305,34
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	$\%$	0,178%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	kNm	46,67
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione			Verificato

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,722	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	21,774	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	734,16	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	6,65	
Altezza utile	d	mm	320	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	300	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	11,81	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$ctg\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	41,99	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	510,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	86,88	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	38,70	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	125,58	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **11/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **300** cm e di altezza pari a **500** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **5** barre con diametro ϕ **16** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

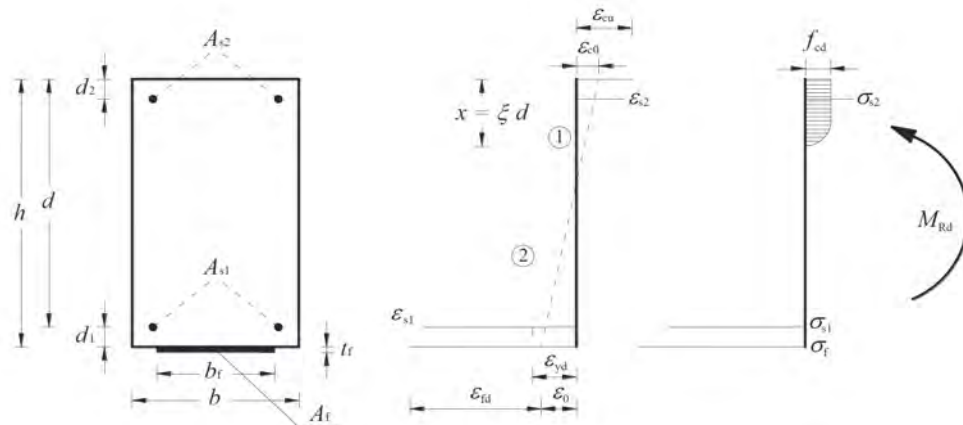


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

(7)

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad (9)$$

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

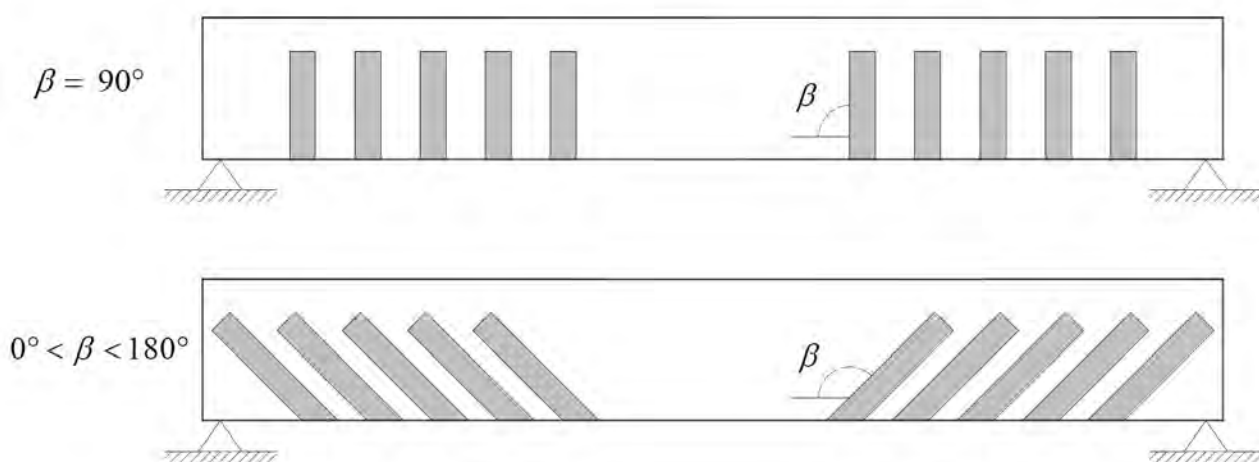


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

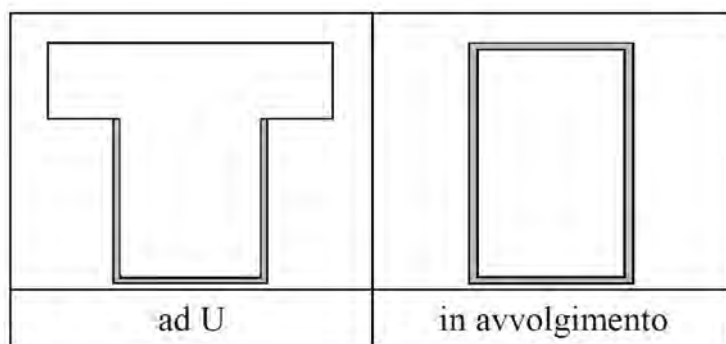


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

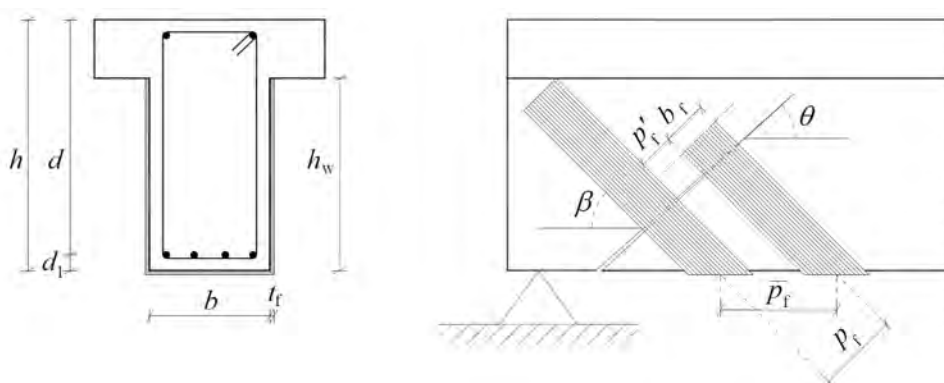


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{F_C} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

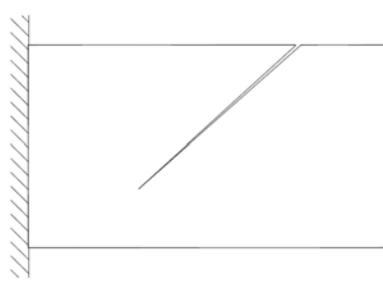


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\Phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\Phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	300	
Altezza	h	mm	500	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	1005	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	kN	11,90
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	kNm	27,61
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	mm	2320,17
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	mm	1817,77
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	mm^3	9,281E+05
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	mm^4	1,860E+09
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	mm	186,24
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	%	0,029%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	kN	11,90
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	kNm	29,76
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	mm	50
Spessore del laminato	t_f	mm	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,25
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	MPa	272,48
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	%	0,159%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	kNm	147,51
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione	Verificato		

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,168	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	17,340	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	655,17	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	11,37	
Altezza utile	d	mm	470	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	300	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$ctg\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	37,47	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	599,25	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	127,61	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	50,72	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	178,33	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **10/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R01**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche.....	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **1200** cm e di altezza pari a **250** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **11** barre con diametro ϕ **16** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa . Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

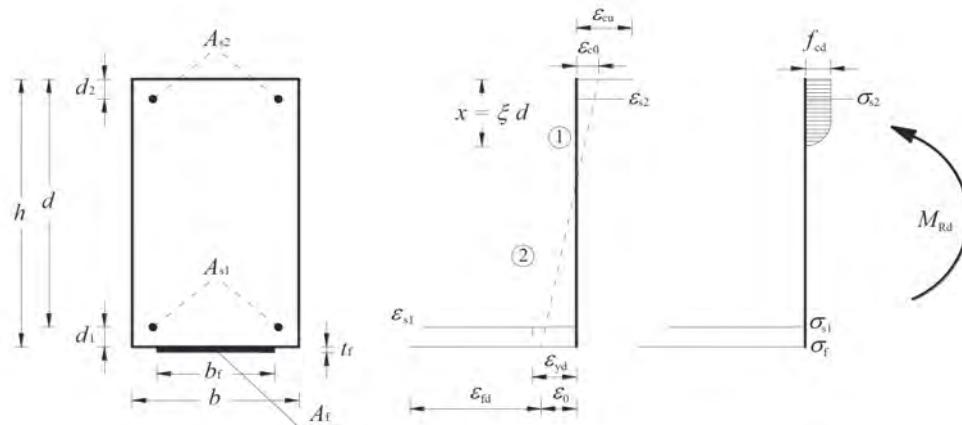


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ε_{fd} è fornita dalla (2); ε_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ε_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ε_{fd}) e del calcestruzzo (ε_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ε_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fd}$$

(7)

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad (9)$$

- Acciaio in trazione

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

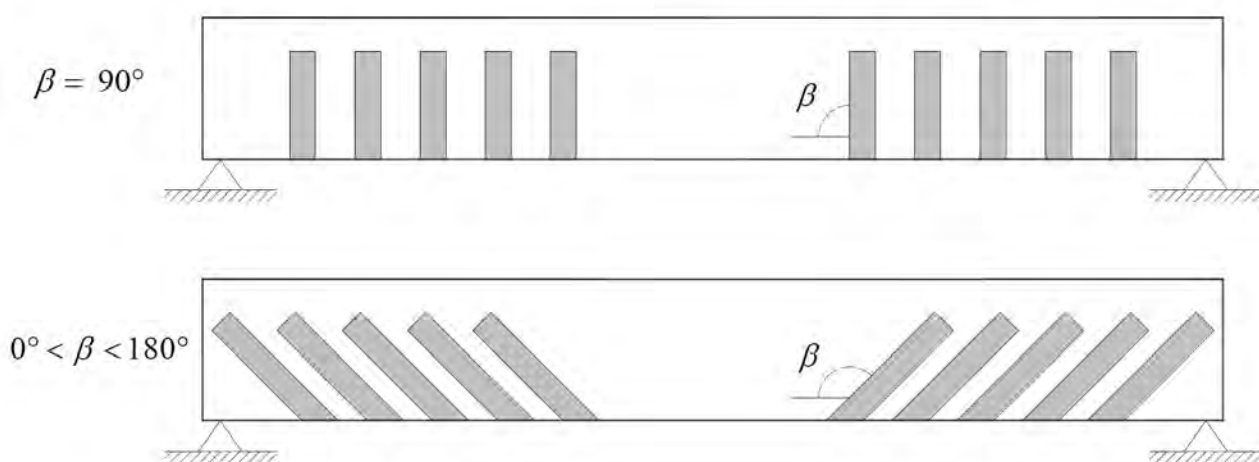


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

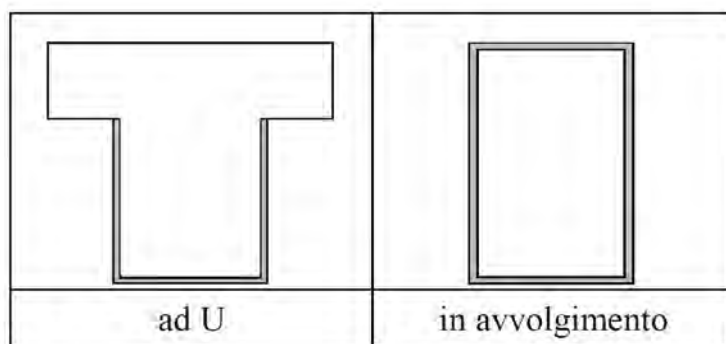


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

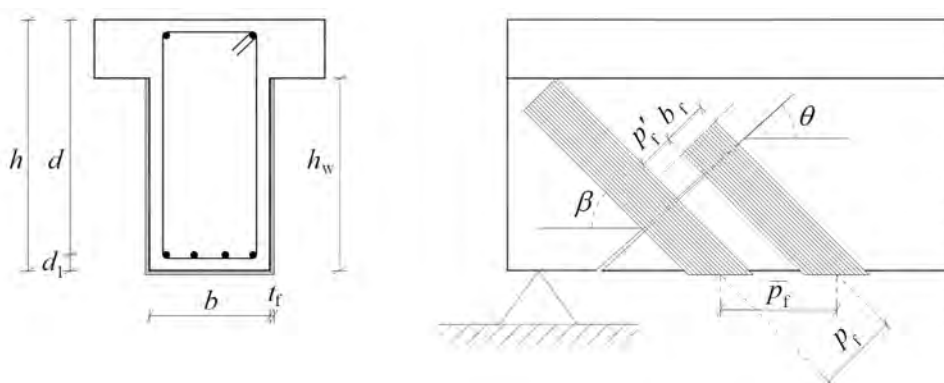


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{F_C} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

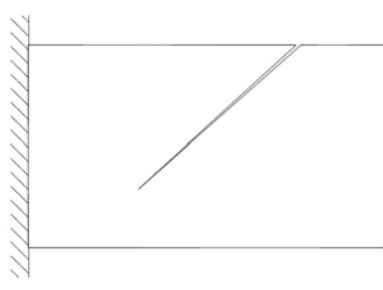


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\Phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\Phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	1200	
Altezza	h	mm	250	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	2211	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	kN	3,80
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	kNm	10,95
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	mm	2881,58
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	mm	1776,30
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	mm^3	4,563E+05
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	mm^4	8,513E+08
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	mm	89,33
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	$\%$	0,010%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	kN	3,80
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	kNm	11,30
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	mm	50
Spessore del laminato	t_f	mm	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,37
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	MPa	284,98
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	$\%$	0,167%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	kNm	142,17
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione			Verificato

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,371	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	18,967	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	685,20	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	3,40	
Altezza utile	d	mm	220	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	1200	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$ctg\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	39,19	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	1122,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	59,73	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	24,83	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	84,56	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **09/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R05**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **1200** cm e di altezza pari a **250** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **4** barre con diametro ϕ **24** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Con riferimento alla situazione esemplificativa rappresentata in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$

(5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

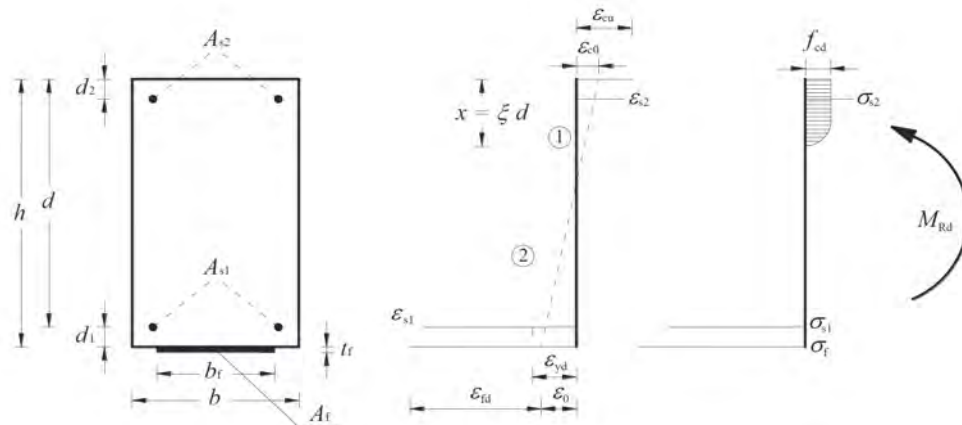


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

(7)

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad (9)$$

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

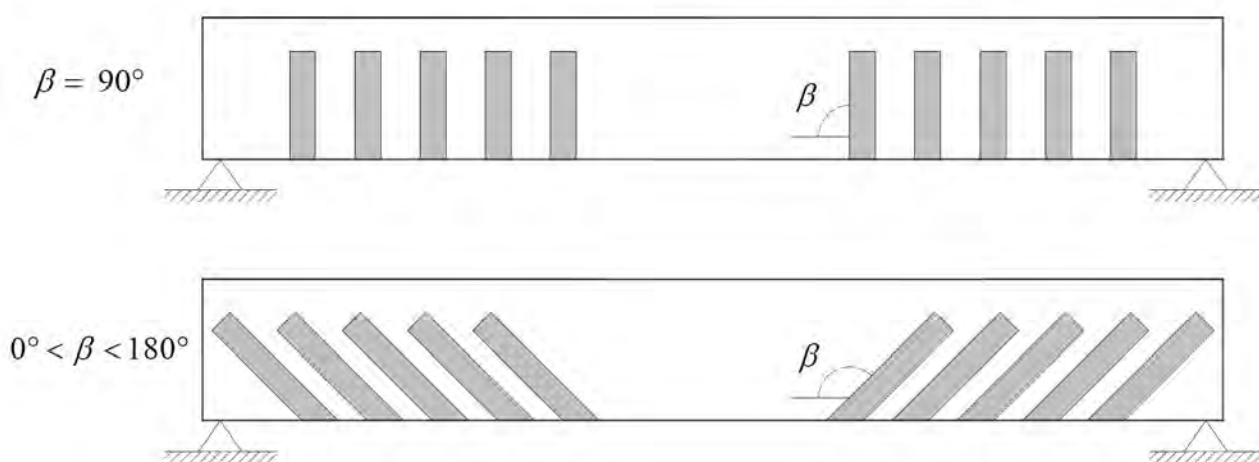


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

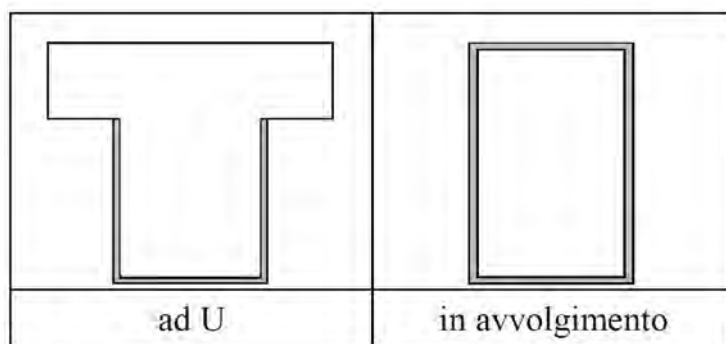


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

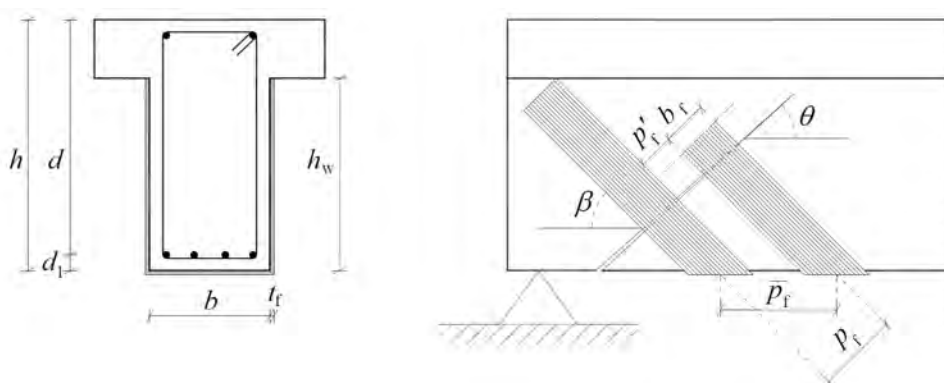


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{F_C} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

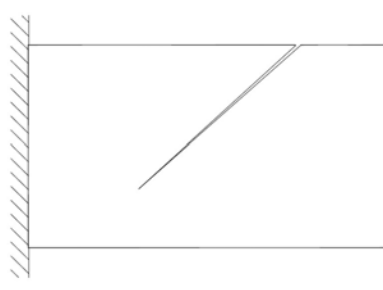


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	1200	
Altezza	h	mm	250	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	1809	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	<i>kN</i>	2,85
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	<i>kNm</i>	16,40
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	<i>mm</i>	5754,39
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	<i>mm</i>	4850,07
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	<i>mm³</i>	1,494E+05
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	<i>mm⁴</i>	7,367E+08
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	<i>mm</i>	80,87
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	<i>%</i>	0,023%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	<i>kN</i>	2,85
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	<i>kNm</i>	15,15
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	<i>mm</i>	50
Spessore del laminato	t_f	<i>mm</i>	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,37
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	<i>MPa</i>	284,98
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	<i>%</i>	0,167%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	<i>kNm</i>	119,15
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione			Verificato

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,371	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	18,967	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	685,20	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	5,65	
Altezza utile	d	mm	220	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	1200	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$\text{ctg}\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	39,19	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	1122,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	59,73	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	24,83	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	84,56	Verificato

7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.



Comune: **PALAU** Provincia: **OLBIA** Data: **09/06/2025**

PROGETTO

Interventi locali di **rinforzo a pressoflessione e taglio di elementi in c.a. con sistemi in FRP** del fabbricato identificato al N.C.E.U. del Comune di **PALAU** al foglio particella sub

Tavola n. **S.R06**

Oggetto: **Relazione generale e di calcolo**

Progettista:

Ing. Salvatore Roberto Addis

Committenza:

Comune di Palau

Direzione dei lavori:

Ing. Gianpaolo Sanna

Impresa esecutrice:

np

Sommario

1. Premessa, descrizione e classificazione dell'intervento	4
2. Normative di Riferimento	5
3. Caratteristiche dei materiali e livello di conoscenza.....	6
3.1. Caratteristiche degli elementi in c.a.	6
3.2. Caratteristiche dei Nuovi Materiali di rinforzo in FRP	7
Sistema LAMELLA CFK 150/2000	7
4. Rinforzo a Pressoflessione di elementi in c.a. con sistemi in FRP	10
4.1. Analisi del comportamento allo stato limite ultimo	10
5. Rinforzo a Taglio	14
6. Risultati delle verifiche.....	19
7. Note e osservazioni	22

1. PREMESSA, DESCRIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELL'INTERVENTO

La presente Relazione è relativa al **“rinforzo di elementi in c.a. soggetti a sollecitazioni di pressoflessione e taglio con sistemi in FRP”** ai sensi del D.M. 17/01/2018” e relativa Circolare (21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.).

Nello specifico, il documento riguarda le ipotesi, le analisi numeriche e i risultati delle verifiche condotte localmente sugli elementi trave in c.a. che sono oggetto di intervento, come è meglio descritto nel prosieguo della presente relazione generale e nei grafici strutturali.

Il fabbricato in oggetto è sito alla **via np n. np in PALAU**. L'immobile è riportato nel **Nuovo Catasto Edilizio Urbano** del Comune di **PALAU (OLBIA)** al foglio , **particella n. .**

In tale contesto, l'intervento in oggetto prevede, **l'applicazione del composito in FRP tipo Sistema LAMELLA CFK 150/2000 della G&P Intech.**

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Il calcolo delle sollecitazioni e la verifica delle strutture sono condotti nel rispetto delle prescrizioni della normativa vigente ed in particolare delle seguenti norme:

- **D.M. M.II.TT. 17.01.2018** “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 (**NTC18**);
- **Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21.01.19** contenente le “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;

Per quanto non adeguatamente trattato dalle NTC18, e purché non espressamente in contrasto con esse, sono state applicate le seguenti Normative di “Comprovata validità” (in linea con quanto specificato dalle stesse NTC18):

- **CNR DT 200 R1/2013** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati;
- **C.S.LL.PP. - 2009** Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP;
- **C.S.LL.PP. - 2019** Linea guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E LIVELLO DI CONOSCENZA

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

L'elemento in c.a. da rinforzare presenta una sezione trasversale di tipo **rettangolare** con larghezza pari a **1200** cm e di altezza pari a **250** cm con copriferro di **30** cm. La sezione è armata longitudinalmente con n. **4** barre con diametro ϕ **16** mm (inferiori) e con n. **1** barre ϕ **1** mm (superiori). L'armatura a taglio, inoltre, è costituita da staffe con diametro ϕ **10** mm e passo ϕ **200** cm.

Dalle analisi eseguite nelle fasi conoscitive è emerso un **livello di conoscenza adeguato (LC2)** delle caratteristiche dei materiali utilizzati per gli elementi oggetto di rinforzo e verifica, così come definito dalla Circolare n°7 del 21.01.19 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018. (vedi Tabella C8.5.IV della Circolare n°7 C.S.LL.PP. del 21/01/19), da cui ne consegue il **Fattore di Confidenza FC** pari a **1,20** da utilizzare nelle verifiche di sicurezza.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

Secondo quanto rilevato si considerano le seguenti caratteristiche dei materiali per le parti esistenti:

Calcestruzzo esistente

Simbolo	Valore
R_{cm}	24,10 MPa
f_{cm}	20,00 MPa
FC	1,20
f_{cd}	14,17 MPa

Acciaio esistente

Simbolo	Valore
f_{ym}	375 MPa
FC	1,20
f_{yd}	312,50 MPa

3.2. CARATTERISTICHE DEI NUOVI MATERIALI DI RINFORZO IN FRP

SISTEMA LAMELLA CFK 150/2000

L'uso dei rinforzi FRP SYSTEM, sotto forma di prodotti laminati pultrusi, in fibra di carbonio e adesivi approvati, per il consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio è una tecnica ampiamente diffusa nel mercato nazionale ed internazionale. Tale sistema è inoltre largamente impiegato nel settore della conservazione e messa in sicurezza di edifici storici e monumentali.



Dal 2005 in Italia il progetto e il dimensionamento degli interventi con l'impiego degli FRP è regolamentato dalle linee guida CNR DT 200/2004, approvate dal Cons.Sup. dei LLPP nel Luglio 2009 assieme alle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il documento aggiornato DT 200 R1 2013 riguarda l'impiego dei materiali compositi nel settore del cemento armato e delle murature. A titolo informativo molti altri Paesi hanno approvato linee guida e norme nel settore degli FRP, tra cui si citano le BS 8110, le DIN 1045-1, le ACI 440.2R-02.

Completano il sistema di rinforzo strutturale FRP SYSTEM, i sistemi di ancoraggio con connettori **AFIX**, **CFIX**, **SFIX**, **SFIX G**, con le barre pultruse **CFK** e **BFK** e gli adesivi approvati della linea **RESIN**, marcati ai sensi della norma EN 1504-4.

Campi d'impiego

I principali impieghi delle lamelle pultruse in fibra di carbonio **CFK** sono i seguenti:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a. e c.a.p. anche di grandi luci
- incremento di resistenza agli urti e riduzione dei meccanismi di collasso di tipo fragile
- incremento di resistenza di pannelli murari, archi, volte a carichi e ad azioni sismiche
- elementi resistenti per azioni sismiche nel piano e fuori dal piano murario
- rinforzo di travi e solai lignei
- rinforzo di travi e colonne in acciaio

Istruzioni per l'impiego

Istruzioni per l'impiego

Il ciclo applicativo di rinforzo strutturale di un c.a. o c.a.p. con **Lamelle CFK** richiede una preventiva accurata preparazione del supporto. Il calcestruzzo deve garantire una resistenza allo strappo di almeno 0,9 MPa. Deve presentarsi irruvidito a mezzo sabbiatura od energica spazzolatura. Il supporto deve inoltre essere asciutto (< 4% di umidità) e privo di olii, grassi, materiale incoerente. La superficie deve essere depolverata. Nel caso di superfici fortemente deteriorate è necessario ricostruire le volumetrie mancanti con malte ad alta resistenza tipo CONCRETE ROCK V-V2. Dislivelli superficiali non devono superare i 5 mm. nei 2 metri. La temperatura di applicazione deve essere nell'intervallo 10-35 °C. Le Lamelle CFK devono essere accuratamente pulite con un panno bianco utilizzando lo speciale solvente RESIN CLEANER al

fine di rimuovere la polvere di carbonio presente. Applicare RESIN PRIMER ed entro 24 h stendere sul supporto e sulle lamelle CFK l'adesivo Resin 90-95. Posizionare la lamella CFK sulla superficie e premere regolarmente con le mani e successivamente con un rullo di gomma dura al fine di permettere la fuoriuscita dell'adesivo tra lamella e supporto. In caso di necessità utilizzare idonei morsetti. L'adesivo in eccesso viene rimosso. Lo spessore consigliato di adesivo è di 1-3 mm. Controllare che il dislivello sia nei limiti stabiliti. Evitare vibrazioni sulla struttura per almeno 1-2 giorni. Per il rinforzo di travi e solai con la tecnica di pretensionamento delle Lamelle CFK consultare l'apposita documentazione tecnica.

Norme generali a cui attenersi in fase applicativa

I risultati prestazionali del rinforzo strutturale FRP SYSTEM sono strettamente legati alla cura con cui vengono eseguite le fasi di applicazione del ciclo. In particolare, dovrà essere posta attenzione ai seguenti aspetti applicativi:

- seguire attentamente i tempi di applicazione, le temperature e le prescrizioni di progetto;
- eseguire una corretta preparazione e regolarizzazione del supporto;
- manipolare le lamelle CFK con attenzione al fine di evitare danneggiamenti in fase esecutiva; pulire adeguatamente le lamelle CFK con apposito diluente RESIN CLEANER prima dell'installazione;
- controllare visivamente la perfetta aderenza della lamella CFK in tutta la sezione evitando la presenza di bolle d'aria;
- ancorare secondo indicazioni progettuali le lamelle CFK in corrispondenza degli appoggi o comunque nelle zone di estremità con tessuti ortogonali o con apposite piastre secondo le disposizioni progettuali.
- Utilizzare i connettori di ancoraggio ove richiesto

Sistema LAMELLA CFK 150/2000**Classificazione e valori nominali**

	Classe di appartenenza	C150/2300
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	150	GPa
Resistenza a trazione nella direzione delle fibre	2300	MPa

Caratteristiche geometriche e fisiche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Spessore Lamina	-	mm	1.4	
Larghezza	-	mm	50, 60, 80, 100, 120, 150	
Lunghezza	-	mm	Variabile	
Densità fibra	-	g/cm ³	1.82	ISO 1183-1:2004(E)
Densità matrice	-	g/cm ³	1.2	ISO 1183-1:2004(E)
Contenuto fibra - in peso	-	%	76	ISO 11667:1997(E)
Contenuto fibra - in volume	-	%	68	ISO 11667:1997(E)
Temperatura di transizione vetrosa - resina di pultrusione	T _g	°C	120	ASTM E1640 (DMA) EN12614:2004
Temperatura di transizione vetrosa - resina di incollaggio	T _g	°C	75	
Temperatura di transizione vetrosa - primer	T _g	°C	69	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	-	°C	-10/+54	CNR DT200-R1/2013
Temperatura di applicazione del sistema	-	°C	-10/+35	-
Reazione al fuoco	-	-	F	EN 13501-1:2007
Resistenza al fuoco	-	-	NPD	EN 13501-2:2007

Proprietà meccaniche

Descrizione	Simbolo	Unità di misura	Valore	Norma di riferimento
Modulo elastico	E _f	GPa	171.1	
Resistenza a trazione - valore medio	f _{fib}	MPa	2898.1	UNI EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione - valore caratteristico	f _{fib}	MPa	2792.1	UNI EN ISO 527-4:1999
Deformazione a rottura	ε _{fib}	%	1.69	

4. RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ELEMENTI IN C.A. CON SISTEMI IN FRP

Quando si intende rinforzare un elemento in c.a. soggetto a sollecitazioni di pressoflessione, in linea generale, il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire sia un adeguato ancoraggio del composito, sia la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Inoltre, il sistema di rinforzo a pressoflessione deve garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale deve perciò precedere il distacco dal supporto.

4.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Nelle sezioni soggette a pressoflessione, il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP al fine di garantire il soddisfacimento della seguente disuguaglianza:

$$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd} \quad (1)$$

dove M_{Sd} è il momento sollecitante di progetto e M_{Rd} è il momento resistente di progetto della sezione rinforzata in presenza dello sforzo assiale sollecitante di calcolo (N_{Sd}).

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo e FRP-calcestruzzo);
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza, inoltre, che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP (ϵ_{fd}) calcolata come:

$$\epsilon_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

dove:

- ϵ_{fk} rappresenta la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo;
- γ_f e η_a rappresentano i coefficienti definiti rispettivamente nella
- **Tabella 1** e nella **Tabella 2**;

Tabella 1: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 2: Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e sistemi FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Infine, è importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a pressoflessione.

Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione rinforzata si effettua in accordo con le ipotesi specificate precedentemente, utilizzando l'equazione di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese, parallelamente all'asse neutro.

Con riferimento alla situazione esemplificativa rappresentata in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima trazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima compressione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito (ϵ_{fd}) definito dalla relazione (2). Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma attraverso le seguenti relazioni (nelle quali si è utilizzata la simbologia di **Figura 1**):

- FRP $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$

(3)

- Calcestruzzo al lembo compresso $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}$

(4)

- Acciaio in compressione $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$

(5)

- Acciaio in trazione $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$

(6)

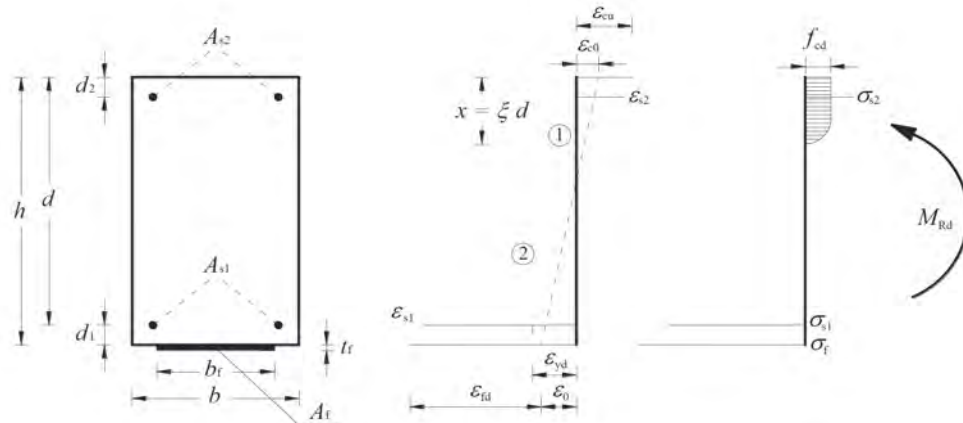


Figura 1: Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

In particolare, x è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta; ϵ_{fd} è fornita dalla (2); ϵ_{cu} è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto); ϵ_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, è generalmente superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre (ϵ_{fd}) e del calcestruzzo (ϵ_{cu}) il valore di progetto della suddetta deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso (ϵ_{cu}) in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

- FRP

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_f}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$

(7)

- Calcestruzzo al lembo compresso

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$

(8)

- Acciaio in compressione

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad (9)$$

- Acciaio in trazione

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

(10)

Per entrambi i tipi di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la posizione (x) dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f = N_{Sd} \quad (11)$$

essendo f_{cd} il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di interventi su calcestruzzi giovani va valutata l'opportunità di applicare un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata. Il valore del momento resistente (M_{Rd}) può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione (x_G):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (x_G - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (x_G - d_2) + A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d - x_G) + A_f \cdot \sigma_f \cdot (h - x_G)] \quad (12)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.00 (**Tabella 1**).

Nelle equazioni (11) e (12) i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x .

Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

5. RINFORZO A TAGLIO

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente. Il rinforzo a taglio va verificato per i soli SLU.

Configurazioni per il rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna della membratura da rinforzare (**Figura 2**) elementi mono o bidimensionali di composito (comunemente tessuti), costituiti da uno o più strati di materiale. Nel caso di applicazioni di elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza le une alle altre, ovvero in maniera discontinua.

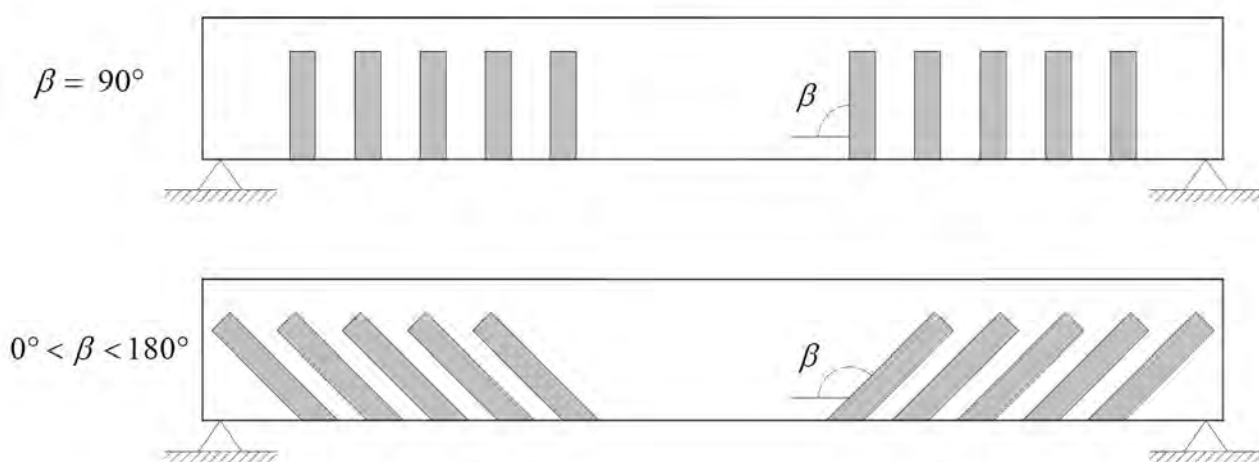


Figura 2: Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di composito adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla sezione può avvenire nei seguenti modi: ad U o in avvolgimento (**Figura 3**).

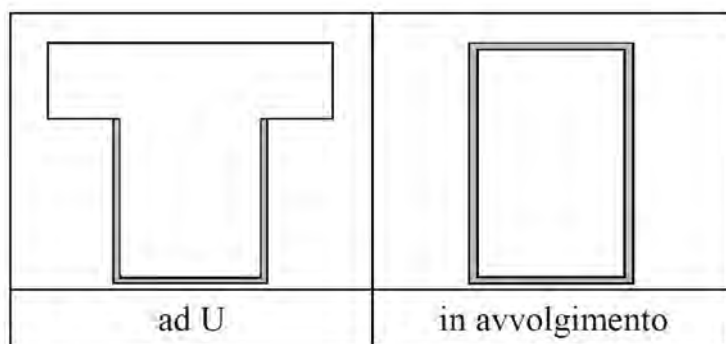


Figura 3: Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni), ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del sistema di rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato inserendo barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale intervento non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzato, la sua efficacia deve essere supportata da evidenze sperimentali.

Resistenza di progetto dell'elemento rinforzato con FRP

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,c}\} \quad (13)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP; $V_{Rd,c}$ è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come indicato ai punti (2) e (4).

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRP, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Mörsch mediante la seguente formula:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

dove (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- d è l'altezza utile della sezione,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato nel § 4.3.3.2,
- t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume $b_f/p_f = 1.0$),
- γ_{Rd} è coefficiente parziale fornito in **Tabella 3**.

Tabella 3: Coefficienti parziali γ_{Rd}

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Nella relazione (14) è possibile introdurre al posto di p_f la quantità $p_f \sin\beta$, essendo p_f il passo delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento (**Figura 4**).

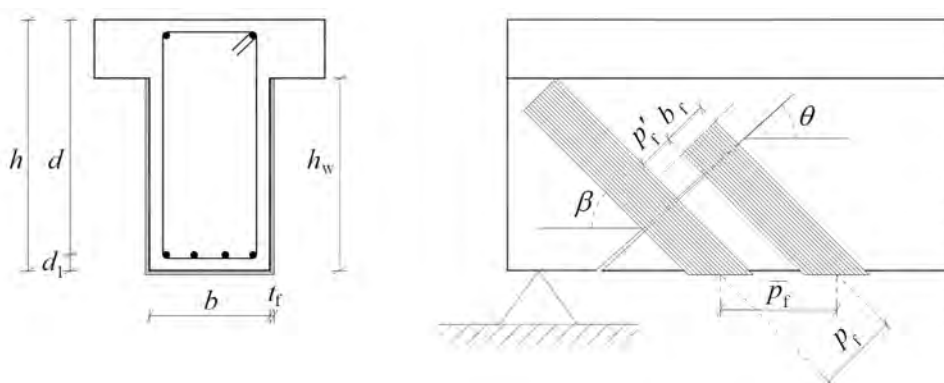


Figura 4: Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, b_f , ed il passo (p_f) delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni: $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ e $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$.

Nell'eventualità in cui dovesse risultare $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$, si deve ricorrere ad un sistema di rinforzo differente (per geometria o per caratteristiche meccaniche).

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare (diametro D), qualora le fibre siano orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ($\beta = 90^\circ$), il contributo del sistema di rinforzo FRP ($V_{Rd,f}$) è fornito dalla relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (15)$$

Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo il modo 1 (vedi § 4.1.3 delle *istruzioni CNR DT200 - 2013*).

In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata di seguito suggerita. Essa si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo (f_{fed}) è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (16)$$

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, da valutarsi mediante la seguente relazione:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (17)$$

con Γ_{Fd} che rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (18)$$

l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla seguente relazione:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200 \text{ mm} \right\} \quad (19)$$

con f_{bd} pari a $(2\Gamma_{Fd})/s_u$ dove $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (*Appendice C – Istruzioni CNR DT200 - 2013*); β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, d è l'altezza utile della sezione e h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa è localizzata inferiormente alla trave, come ad esempio accade per una mensola. In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto (**Figura 5**). In tali situazioni, deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad U, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza f_{fed} si deve sempre far ricorso alla (16).

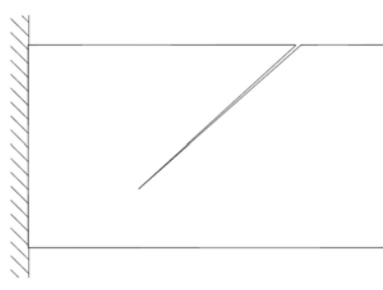


Figura 5: Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\Phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right] \quad (20)$$

dove f_{fdd} è ancora una volta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutarsi mediante la (21), ed inoltre:

$$\Phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5 \quad (21)$$

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (20) il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo. Per la valutazione del fattore geometrico k_b fornito dalla relazione che segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1 \quad (22)$$

si deve assumere:

- $b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce;
- $b = \min\{0.9 \cdot d, h\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (20). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (16).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro D , con $\beta = 90^\circ$, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (23)$$

dove E_f è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e $\varepsilon_{f,max}$ è un opportuno valore limite della deformazione nel composito da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a $5 \cdot 10^{-3}$.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE

Caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione esistente				
Base	b	mm	1200	
Altezza	h	mm	250	
Armatura in zona tesa	A _{s1}	mm ²	804	
Copriferro dell'armatura in zona tesa	d ₁	mm	30	
Armatura in zona compressa	A _{s2}	mm ²	1	
Copriferro dell'armatura in zona compressa	d ₂	mm	30	
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cm}	MPa	20,00	(come determinato dalle prove sui materiali)
Valore medio della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{ctm}	MPa	1,57	
Valore medio della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sm}	MPa	375	(come determinato dalle prove sui materiali)
Fattore di confidenza	FC	-	1,20	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f _{cd}	MPa	14,17	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a trazione dell'acciaio	f _{sd}	MPa	312,50	

Verifica a Pressoflessione allo SLU per tensioni normali (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)			
Sforzo normale preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	N_0	<i>kN</i>	63,40
Momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.2.2.2-(1))	M_0	<i>kNm</i>	9,15
Eccentricità preesistente all'applicazione del rinforzo	e_0	<i>mm</i>	144,32
Distanza dal lembo compresso del centro di pressione preesistente	c_0	<i>mm</i>	-257,60
Momento statico rispetto all'asse neutro	S_0	<i>mm³</i>	-2,004E+06
Momento d'inerzia rispetto all'asse neutro	I_0	<i>mm⁴</i>	4,673E+08
Profondità dell'asse neutro nella condizione preesistente all'applicazione del rinforzo	x_0	<i>mm</i>	24,34
Deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza del lembo teso	ε_0	<i>%</i>	-0,051%
Valore di calcolo dello sforzo normale allo SLU	N_{Sd}	<i>kN</i>	63,40
Valore di calcolo del momento sollecitante allo SLU	M_{Sd}	<i>kNm</i>	15,40
Coefficiente parziale di sicurezza (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 3.4.1-(1))	γ_f	-	1,50
Coefficiente di modello (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-1)	γ_{Rd}	-	1,00
Fattore di conversione ambientale (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 3-2)	η_a	-	0,85
Coefficiente relativo alla condizione di carico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, Tabella 4.1.4(2))	k_q	-	1,00
Numero di strati	n	-	1
Larghezza del laminato	b_f	<i>mm</i>	50
Spessore del laminato	t_f	<i>mm</i>	1,200
Coefficiente correttivo geometrico (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_b	-	1,37
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.4-(2))	$k_{G,2}$	-	0,100
Valore di calcolo della tensione massima nel rinforzo di FRP	$f_{fdd,2}$	<i>MPa</i>	284,98
Valore di calcolo della deformazione massima nel rinforzo di FRP	ε_{fdd}	<i>%</i>	0,167%
Valore di calcolo del momento resistente allo SLU	M_{Rd}	<i>kNm</i>	53,77
Esito della verifica allo SLU per Presso-flessione			Verificato

Verifica allo SLU per taglio (cfr. CNR-DT 200 R1/2013-4.2.2)				
Lunghezza d'ancoraggio	l_d	mm	100	
Ulteriore coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	k_G	-	0,370	(preimpregnati $k_G=0.023$; impregnati in situ $k_G=0.037$)
Valore di calcolo dell'energia di frattura	Γ_{Fd}	N/mm	2,371	
Scorrimento ultimo all'interfaccia	s_u	mm	0,250	
Tensione massima di scorrimento all'interfaccia	f_{bd}	MPa	18,967	
Coefficiente correttivo (cfr. CNR-DT 200 R1/2013, 4.1.2-(3))	γ_{Rd}	-	1,25	
Lunghezza ottimale d'ancoraggio	l_{ed}	mm	200,00	
	$\gamma_{f,d}$	-	1,20	(Compreso tra 1.20 e 1.50 a giudizio del progettista)
Valore di calcolo della resistenza d'estremità	f_{idd}	MPa	685,20	
Valore di calcolo del taglio sollecitante allo SLU	V_{Sd}	kN	8,85	
Altezza utile	d	mm	220	
Larghezza dell'anima	b_w	mm	1200	
Area delle staffe in acciaio	A_{sw}	mm ²	157	
Passo delle staffe in acciaio	s	mm	200	
	α_c	-	1,00	
Valore di calcolo della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	MPa	9,44	
Valore di calcolo della resistenza a trazione dell'acciaio	f_{sd}	MPa	271,74	
Inclinazione del puntone di calcestruzzo	θ		45,00	
	θ	rad	0,79	
	$ctg\theta$	rad	1,00	
Inclinazione delle staffe metalliche	α		45,00	
	α	rad	0,79	
Inclinazione dell'armatura in FRP	β		45,00	
	β	rad	0,79	
Numero di strati	-		1	
Spessore della striscia in FRP	t_f	mm	1,200	
Larghezza della striscia in FRP	b_f	mm	50	
Passo delle strisce in FRP (in direzione ortogonale alle stesse)	p_f	mm	50	(CNR-DT 200 R1/2013 - Figura 4-9)
Altezza dell'anima della trave interessata dal rinforzo in FRP	h_w	mm	50	
Tensione efficace di calcolo della striscia in FRP	f_{fed}	MPa	39,19	
Fattore parziale di sicurezza relativo al rinforzo a taglio	γ_{Rd}		1,5	(CNR-DT 200 R1/2013 - Tabella 3-1)
Valore di calcolo della resistenza a "taglio compressione"	$V_{Rd,c}$	kN	1122,00	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Staffe in acciaio	$V_{Rd,s}$	kN	59,73	
Valore di calcolo della resistenza a "taglio trazione" - Strisce in FRP	$V_{Rd,f}$	kN	24,83	
Valore di calcolo della resistenza a taglio allo SLU	V_{Rd}	kN	84,56	Verificato

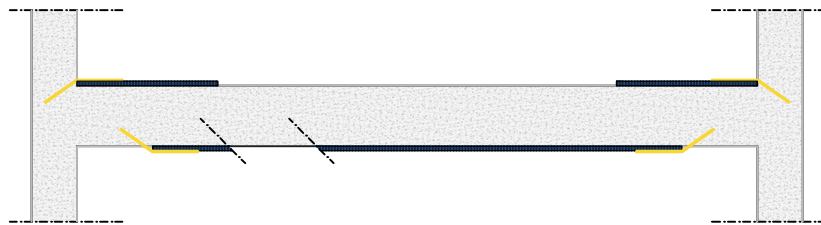
7. NOTE E OSSERVAZIONI

Vantaggi LAMELLA CFK

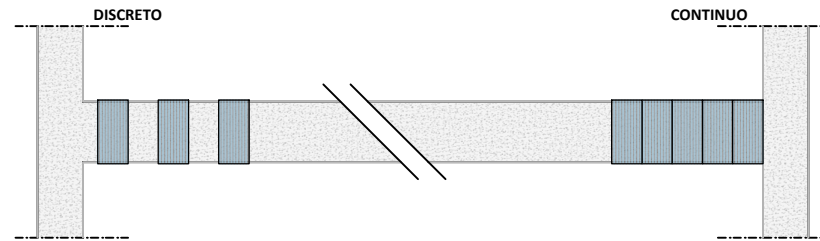
- Caratteristiche meccaniche e prestazioni molto elevate.
- Elevate resistenze chimiche e alla corrosione.
- Assenza di creep.
- Assenza di scorrimento all'interfaccia rinforzo-struttura.
- Affidabilità e durabilità.
- Buona resistenza in ambiente umido.
- Elevata resistenza a strappo del sistema anche su supporti non omogenei.
- Peso del sistema molto ridotto.
- Spessore medio del rinforzo 3 mm ca.
- Semplicità applicativa del sistema senza onerosi allestimenti di cantiere
- e con disagi contenuti.
- Tempi di riutilizzo nulli o molto contenuti.
- Sistema ampiamente testato nel tempo.
- Tempi e costi di applicazione ridotti.

RINFORZO A FLESSIONE

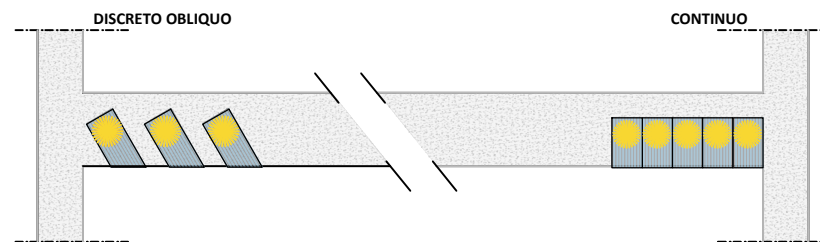
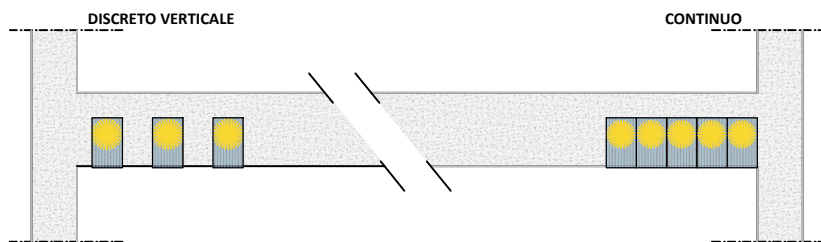
RINFORZO A FLESSIONE



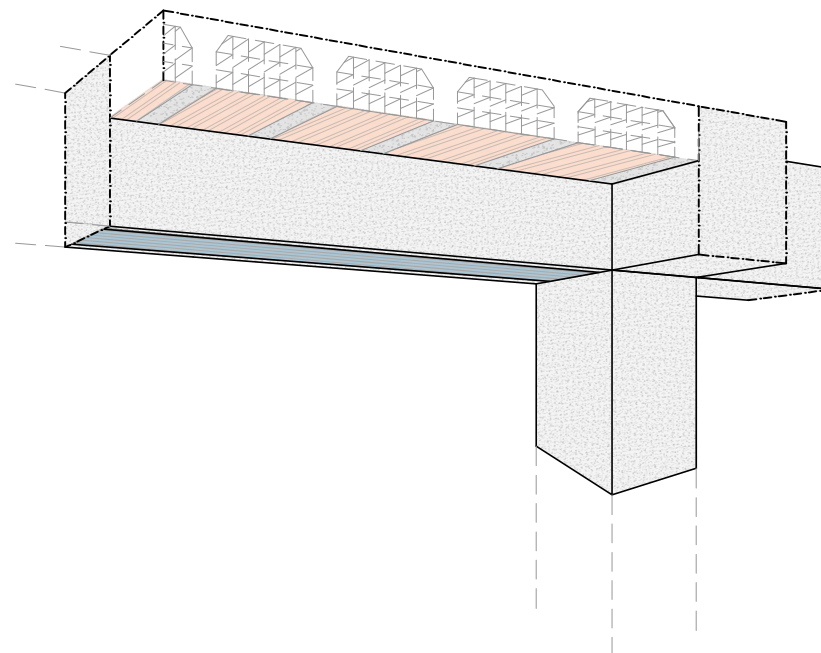
RINFORZO A TAGLIO

RINFORZO A TAGLIO
AVVOLGIMENTO COMPLETO

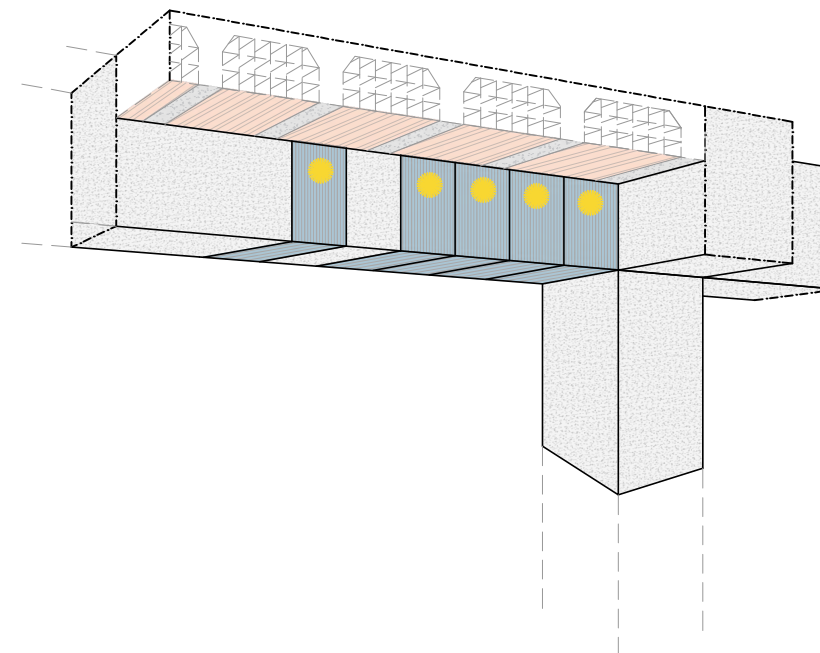
RINFORZO A TAGLIO IN AVVOLGIMENTO CONTINUO E IN DISCRETO



RINFORZO A FLESSIONE



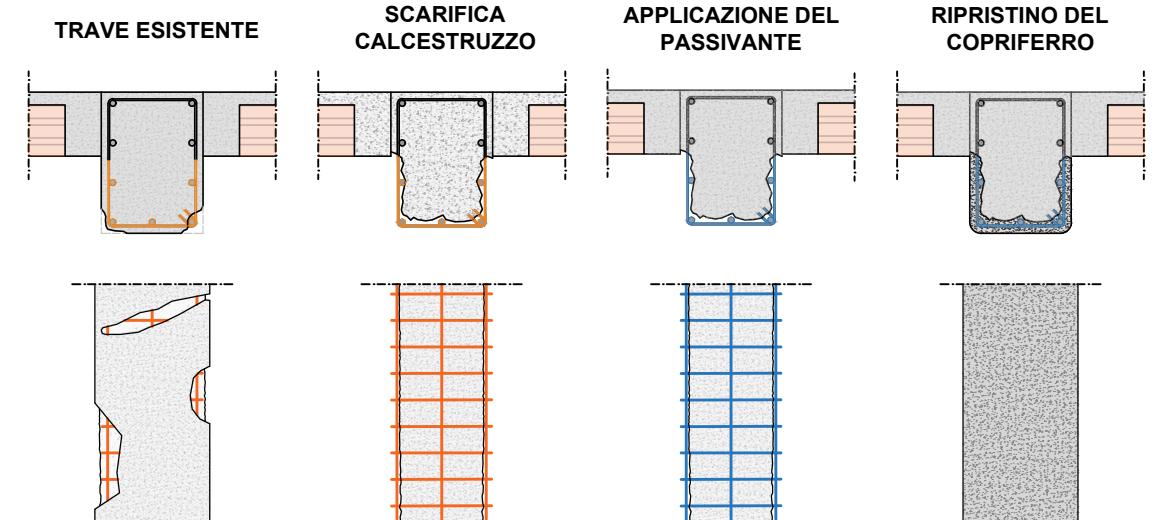
RINFORZO A TAGLIO



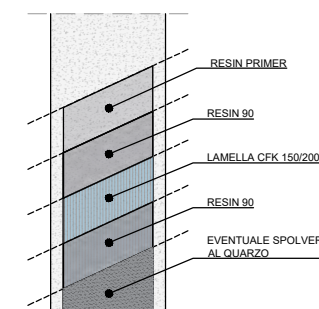
FASI APPLICATIVE RINFORZO PILASTRI

- Preparazione del supporto con rimozione dell'eventuale intonaco e di porzioni incoerenti di calcestruzzo. Eventuale ripristino delle armature eventualmente ossidate con integrazione dell'area persa e passivazione delle stesse mediante passivante **FERROSAN** o **RESIN 78**. Ricostruzione delle superfici ammalorate di calcestruzzo con malta cementizia bicomponente **CONCRETE ROCK V2**. Arrotondamento degli spigoli con raggio minimo $r = 2.5$ cm.
- Applicazione del primer epossidico **RESIN PRIMER** come fondo per l'applicazione della resina epossidica bicomponente **RESIN 75** oppure per la resina tixotropica in pasta **RESIN 90**.
- Rinforzo a pressoflessione e taglio con tessuti in carbonio:
Applicazione del primo strato di **RESIN 75** e successiva applicazione di strisce di tessuto in fibra di carbonio (**C-SHEET 240/300-400-600** classe 210C CVT, oppure ad alto modulo **C-SHEET 390/300-400-600** classe 350/2800 CVT), in avvolgimento discontinuo o continuo per il rinforzo a taglio e a confinamento del pilastro, con sovrapposizioni verticali di 2 cm ed orizzontali di 20 cm. Impregnazione del tessuto con **RESIN 75** per ultimare il primo strato di rinforzo.
 - Rinforzo a pressoflessione con lamelle pultruse in carbonio:
Applicazione del primo strato di **RESIN 90** e successiva applicazione di lamelle pultruse in fibra di carbonio (lamella **CFK 150/2000** classe C 150/2300 CVT, oppure ad alto modulo con lamella **CFK 200/2000** classe 200/1800 CVT). Applicazione dello strato di copertura sulla lamella CFK con **RESIN 90**.
- Per il miglioramento dell'ancoraggio alle estremità del rinforzo flessionale in alternativa alle strisce di tessuto in avvolgimento per il rinforzo a taglio, è possibile disporre anche dei connettori a fiocco. Tali connettori possono essere in fibra di carbonio **CFIX** o in fibra aramidica **AFIX**, inghisati nel foro adeguatamente predisposto con adesivo **RESIN 75**.
- Eventuali finiture con intonaco civile o di altro tipo, previo spolvero al quarzo su resina ancora fresca.

SCHEMA APPLICATIVO RIPRISTINO E TRATTAMENTO ARMATURE



SCHEMA APPLICATIVO TESSUTO

SISTEMA SRP
1 STRATO

SCHEMA APPLICATIVO CONNETTORE A FIOCCO

