



Università Politecnica delle Marche

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura

I MATERIALI COMPOSITI FIBRORINFORZATI FRP: RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A.

Ing. Erica Magagnini

Riabilitazione del Patrimonio LM EA Riabilitazione Strutturale LM Civ, LM Edi

Prof.sa Laura Ragni

Il presente materiale ha finalità meramente didattiche e illustrate e non è modificabile dagli studenti, che potranno soltanto visualizzarlo e/o scaricarlo, escludendo ogni possibilità di ridistribuirlo senza il permesso esplicito del docente così come ogni possibilità di commercializzarlo.

INTRODUZIONE: CARATTERISTICHE FISICO – MECCANICHE

Caratteristiche fisico-meccaniche

I FIBER REINFORCED POLYMERS, comunemente denominati FRP o **MATERIALI FIBRORINFORZATI A MATRICE POLIMERICA**, costituiscono una vasta gamma di materiali compositi costituiti da una **matrice polimerica di natura organica** (resina epossidica) con la quale viene impregnato un **riforzo in fibra lunga e continua** di elevate proprietà meccaniche.

FIBRE

- Sostengono i carichi
- Limitano le deformazioni

MATRICE

- Permette l'utilizzo strutturale delle fibre tenendole insieme e trasmettendo la sollecitazione esterna
- Protegge le fibre dagli agenti ambientali
- Conferisce al composito tenacità e resistenza alla fatica
- Permette l'ancoraggio alla struttura

conferiscono RESISTENZA e RIGIDEZZA al composito

permettono IL TRASFERIMENTO E LA RIPARTIZIONE DEGLI SFORZI

Caratteristiche fisico-meccaniche

Generalmente le fibre possiedono delle elevate proprietà meccaniche (resistenza e rigidezza) ed una bassa densità, mentre la matrice è caratterizzata da proprietà meccaniche più scadenti.

FIBRE IMPIEGATE IN EDILIZIA

- FIBRE DI CARBONIO
- FIBRE DI VETRO
- FIBRE ARAMIDICHE
- FIBRE DI BASALTO
- FIBRE DI ACCIAIO

MATRICI IMPIEGATE IN EDILIZIA

- RESINE POLIMERICHE TERMOINDURENTI:
 - RESINE EPOSSIDICHE
 - RESINE POLIESTERE O VINILESTERE

Recentemente si sta diffondendo l'utilizzo di materiali fibrorinforzati in cui è utilizzata una MATRICE CEMENTIZIA INORGANICA in sostituzione della resina polimerica



Si parla quindi di compositi FRCM - Fiber Reinforced Cementitious Matrix.

Caratteristiche fisico-meccaniche

Forme di utilizzo degli FRP nel recupero strutturale

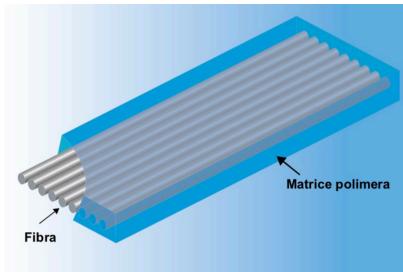
**SISTEMI
IMPREGNATI IN
SITU
(SISTEMA WET
LAY UP)**



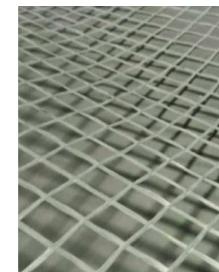
TESSUTI DI FIBRE o RETI

inglobati nella resina di incollaggio durante la fase di applicazione

N.B. La resina funge anche da adesivo con il substrato interessato.



MAPEWRAP C
tessuti in fibra di carbonio



MAPEWRAP G
tessuti in fibra di vetro

Direzione delle fibre	UNI-Direzionale	BI-Direzionale	QUADRI-Direzionale
Modulo elastico a trazione	252 GPa	390 GPa	230 GPa
Grammatura	300 e 600 g/m ²	300 e 600 g/m ²	230, 300 e 360 g/m ²

UNI-Direzionale	UNI-Direzionale
70 GPa	89 GPa
900 g/m ²	400 e 600 g/m ²

TESSUTI UNIASSIALI

costituiti da fibre disposte lungo una sola direzione



TESSUTI BIASSIALI

ottenuti per tessitura di fibre lungo due direzioni generalmente ortogonali

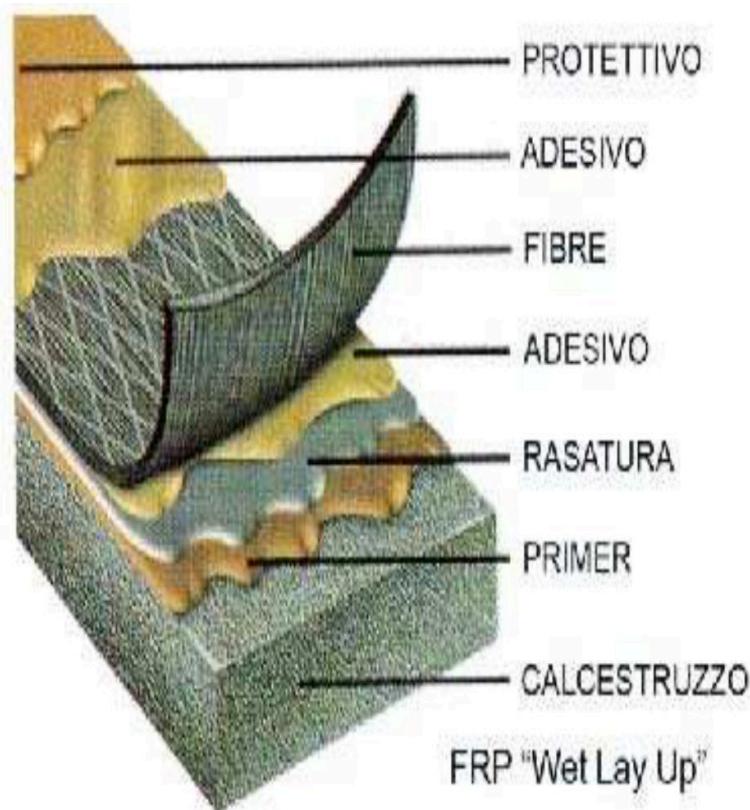
TESSUTI MULTIASSIALI
ottenuti per tessitura di fibre lungo più direzioni variamente inclinate

RETI BIDIREZIONALI

Forme di utilizzo degli FRP nel recupero strutturale

MODALITA' APPLICATIVE (SISTEMA IMPREGNATO IN SITO – WET LAY UP):

- **PREPARAZIONE DEL SUPPORTO**
(rimozione strati superficiali e livellamento delle superfici)
- **EVENTUALE STESURA DEL PRIMER**
(prodotto che favorisce l'adesione della resina)
- **STESURA DEL PRIMO STRATO DELLA MATRICE**
- **STESURA DELLE FIBRE SU MATRICE FRESCA**
- **STESURA DEL SECONDO STRATO DI MATRICE EVENTUALI FINITURE SUPERFICIALI** (*sabbiatura con sabbia al quarzo*)



Caratteristiche fisico-meccaniche

Forme di utilizzo degli FRP nel recupero strutturale

SISTEMI PREFORMATI



LAMINATI di spessore 1-2 mm

o sottili fogli flessibili di spessore 0,2 mm circa

Sono costituiti da componenti di varia forma preparati in stabilimento mediante pultrusione, i quali sono incollati mediante adesivi all'elemento strutturale da rinforzare.

I compositi preformati sono caratterizzati da una disposizione unidirezionale delle fibre.

N.B. Processo di pultrusione: Processo di estrusione in cui la fibra viene annegata in un bagno contenente la matrice polimerica ed assoggettata contemporaneamente ad uno sforzo di trazione

CARBOPLATE | lamine pultruse in fibra di carbonio

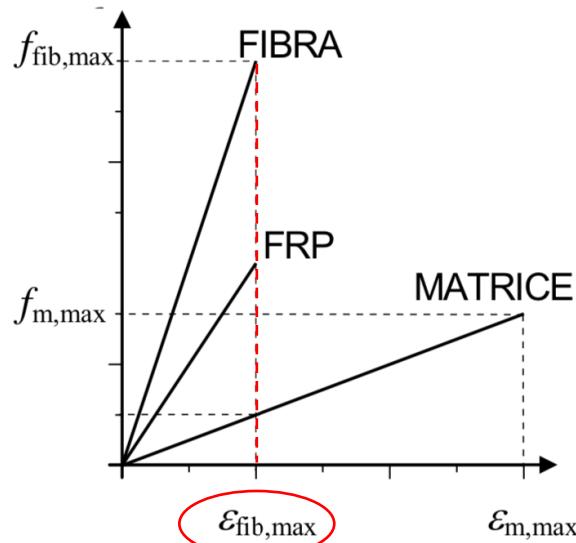
	CARBOPLATE E 170	CARBOPLATE E 200	CARBOPLATE E 250
			
Modulo elastico a trazione	≥ 160 GPa	≥ 190 GPa	250 GPa
Larghezza disponibile	Rotoli con larghezze standard di 50, 100 e 150 mm		

Proprietà meccaniche di un materiale fibrorinforzato FRP

Resistenza a trazione e legame costitutivo

Nei compositi fibrorinforzati FRP le fibre svolgono il ruolo di elementi portanti sia in termini di resistenza che di rigidezza, mentre la matrice, oltre a proteggere le fibre, funge da elemento di trasferimento degli sforzi tra le fibre ed eventualmente tra queste ultime e l'elemento strutturale a cui il composito è stato applicato.

La maggior parte dei compositi è costituita da fibre che posseggono una elevata resistenza e rigidezza, mentre la loro deformazione a rottura è inferiore a quella della matrice.



Il composito presenta una rigidezza inferiore a quella delle fibre e perviene a rottura in corrispondenza di una deformazione, $\varepsilon_{fib,max}$, coincidente con quella di rottura delle fibre.

Superata tale deformazione, infatti, non è possibile un completo trasferimento degli sforzi dalle fibre alla matrice.

La resistenza a trazione è il principale parametro meccanico caratterizzante un materiale FRP/FRCM.



Caratteristiche fisico-meccaniche

Proprietà meccaniche di un materiale fibrorinforzato FRP

Scheda Tecnica Tessuto unidirezionale in fibra di carbonio ad alta resistenza ed elevato modulo elastico

DATI IDENTIFICATIVI DEL PRODOTTO

Tipo di fibra:	carbonio ad alta resistenza ed elevato modulo elastico
Aspetto:	tessuto unidirezionale

PROPRIETÀ MECCANICHE TESSUTO SECCO

Caratteristiche fisico-meccaniche

Proprietà meccaniche di un materiale fibrorinforzato FRP

Scheda Tecnica Tessuto unidirezionale in fibra di vetro

DATI IDENTIFICATIVI DEL PRODOTTO

Tipo di fibra:	vetro Type E
Aspetto:	tessuto unidirezionale

PROPRIETÀ MECCANICHE TESSUTO SECCO

Grammatura (g/cm ³):	300	900
Spessore equivalente di tessuto secco (mm):	0,118	0,342
Area resistente per unità di larghezza (mm ² /m):	118	342
Resistenza meccanica a trazione (N/mm ²):	2560	2560
Modulo elastico a trazione (N/mm ²):	80.700	80.700
Allungamento a rottura (%):	3-4	3-4

Caratteristiche fisico-meccaniche

Proprietà meccaniche di un materiale fibrorinforzato FRP

Scheda Tecnica Tessuto unidirezionale in fibra di basalto

DATI IDENTIFICATIVI DEL PRODOTTO		
Tipo di fibra:	basalto	
Aspetto:	tessuto unidirezionale	
PROPRIETÀ MECCANICHE TESSUTO SECCO		
Grammatura (g/cm ³):	400	600
Spessore equivalente di tessuto secco (mm):	0,143	0,215
Area resistente per unità di larghezza (mm ² /m):	142,5	213,8
Resistenza meccanica a trazione (N/mm ²):	≥ 2500	≥ 2500
Modulo elastico a trazione (N/mm ²):	≥ 70.000	≥ 70.000
Allungamento a rottura (%):	≥ 3,5	≥ 3,5

Proprietà meccaniche di un materiale fibrorinforzato FRP

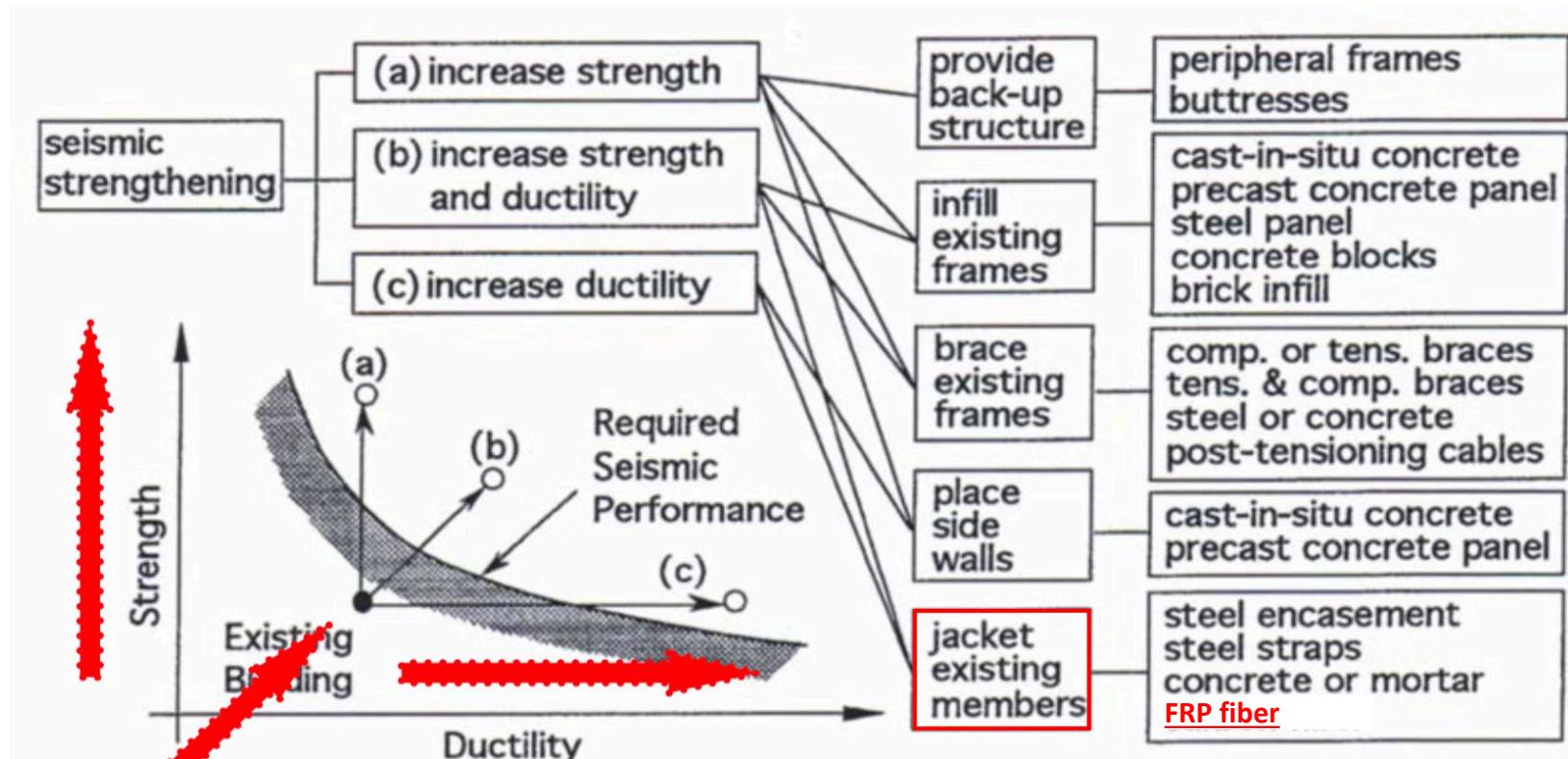
Scheda Tecnica Lamina pultrusa in fibra di carbonio

Resistenza a trazione caratteristica f_{tk} , ASTM D3039	2.300 MPa	2.300 MPa	2.050 MPa
Modulo elastico medio a trazione, ASTM D3039	165 GPa	165 GPa	200 GPa
Deformazione ultima media a trazione, ASTM D3039	1,8 %	1,8 %	1,4 %
Spessore nominale	1,4 mm	1,4 mm	1,4 mm
Larghezza	5 cm	10 cm	5 cm

N.B. Resistenza caratteristica = resistenza media - 3 x scarto quadratico medio

STRATEGIE DI RINFORZO DI STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO CON FRP

Placcature e fasciature in materiali compositi



Placcature e fasciature in materiali compositi

L'uso di idonei materiali compositi fibrorinforzati nel rinforzo sismico di elementi in c.a. è finalizzato agli obiettivi seguenti:

- aumento della resistenza a flessione e presso-flessione;
- aumento della resistenza a taglio di pilastri e pareti mediante applicazione di fasce con le fibre disposte secondo la direzione delle staffe;
- aumento della resistenza nelle parti terminali di travi e pilastri mediante applicazione di fasce con le fibre disposte secondo la direzione delle barre longitudinali ed opportunamente ancorate;
- aumento della duttilità nelle parti terminali di travi e pilastri mediante fasciatura con fibre continue disposte lungo il perimetro; miglioramento dell'efficienza delle giunzioni per sovrapposizione, sempre mediante fasciatura con fibre continue disposte lungo il perimetro;
- confinamento di pilastri;
- rinforzo di nodi trave-pilastro.

Placcature e fasciature in materiali compositi

L'intervento di adeguamento sismico attraverso FRP deve essere effettuato tenendo presente che:

- errori grossolani vanno eliminati;
- forti irregolarità degli edifici (in termini di resistenza e/o rigidezza) non possono essere sanate con tale tecnica;
- una maggiore regolarità in resistenza può essere ottenuta rinforzando un numero ridotto di elementi;
- risultano sempre opportuni interventi volti a migliorare la duttilità locale;
- l'introduzione di rinforzi locali non deve ridurre la duttilità globale della struttura.

Le NTC 2018 non contengono espressamente criteri per il calcolo dei rinforzi con FRP ed FRCM.

Ai fini delle verifiche di sicurezza degli elementi rafforzati con FRP si possono adottare le Istruzioni 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»

Concetti base e problematiche speciali

Il sistema di rinforzo deve essere posizionato nelle **zone in cui è necessario resistere a sforzi di trazione**. Al composito non devono essere affidati sforzi di compressione, a meno che non si tratti di elementi ben confinati (inglobati nelle membrature rinforzate), ovvero di pultrusi adeguatamente rigidi sia estensionalmente che flessionalmente.

Le verifiche degli elementi rinforzati devono essere condotte nei confronti degli Stati Limite Ultimi (SLU) e, dove richiesto, nei confronti degli Stati Limite di Esercizio (SLE). Per ciascun stato limite deve risultare:

$$E_d \leq R_d,$$

dove E_d ed R_d sono, rispettivamente, i valori di progetto (o di calcolo) della generica **domanda** presa in considerazione e della corrispondente **capacità**.

L'incremento della capacità di calcolo dell'elemento rinforzato con FRP non può risultare superiore del 50% rispetto a quella dell'elemento non rinforzato. La limitazione non si applica per azioni eccezionali e sismiche.

Concetti base e problematiche speciali

Il valore di calcolo, X_d , della generica proprietà di resistenza o di deformazione di un materiale FRP è espresso mediante una relazione del tipo (par. 3.3.3 CNR-DT 200 R1/2013):

$$X_d = \eta \cdot \frac{X_k}{\gamma_m},$$

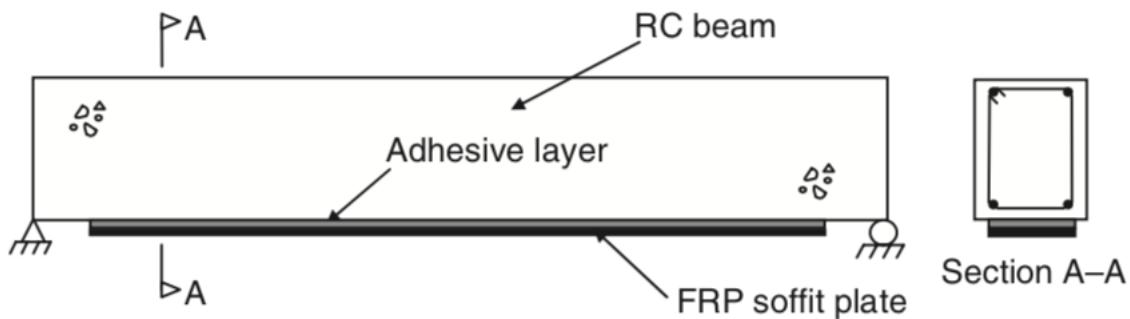
η = fattore di conversione, tiene conto di problemi speciali di progetto

X_k = valore caratteristico della proprietà in questione

γ_m = coefficiente parziale del materiale FRP

Nei riguardi degli Stati Limite Ultimi al coefficiente parziale $\gamma_m = \gamma_f$ dei materiali FRP può essere attribuito il valore di 1.10. Per il solo Stato Limite Ultimo di distacco dal supporto sono invece suggeriti valori di $\gamma_m = \gamma_{f,d}$ **variabili**, a giudizio del progettista, **da 1.20 a 1.50** in funzione della maggiore o minore possibilità di prevedere, per la specifica applicazione, l'effettivo comportamento del composito nei riguardi del distacco dal supporto (par. 3.4.1 CNR-DT 200 R1/2013).

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.



Il rinforzo a flessione si rende necessario per elementi strutturali soggetti ad un **momento flettente di progetto maggiore della corrispondente resistenza**.

Il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, oppure uno o più strati di tessuto impregnati in situ.

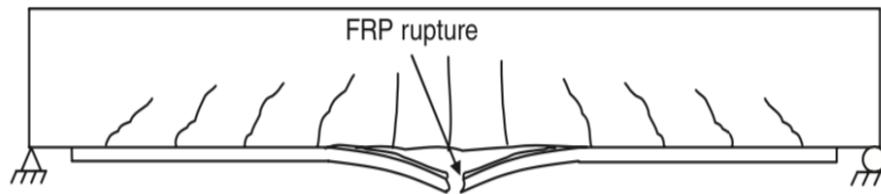


Nelle applicazioni pratiche, vengono spesso utilizzate misure di ancoraggio cautelative alle estremità delle piastre, ma in genere non vengono esplicitamente prese in considerazione nei calcoli di progettazione.

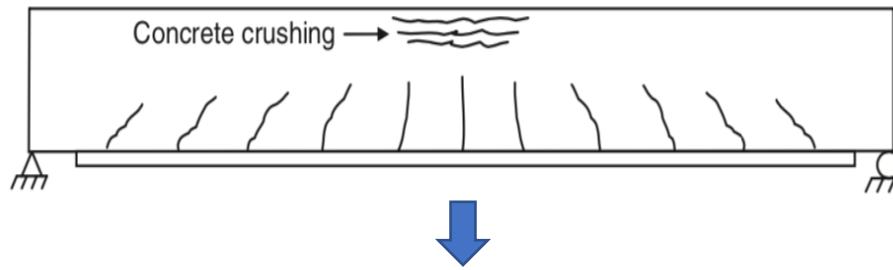
Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

Rotture duttili per flessione

Rottura flessionale per raggiungimento della resistenza a trazione dell'FRP (= rottura dell'FRP)



Rottura flessionale per schiacciamento del calcestruzzo compresso

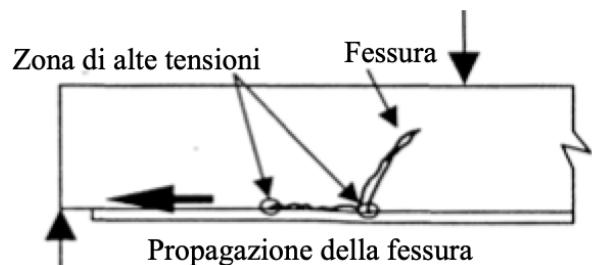
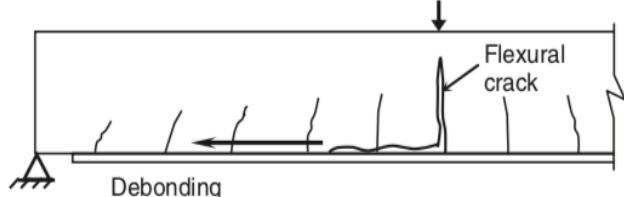


L'azione composita tra la piastra incollata e la trave in cemento armato viene mantenuta fino alla rottura della sezione critica.

Questo meccanismo è sinonimo del miglior utilizzo dei materiali e si manifesta con il superamento, da parte dell'acciaio di armatura, del limite di snervamento con un comportamento relativamente duttile.

Rotture fragili per perdita di aderenza

Distacco intermedio causato da fessure da flessione

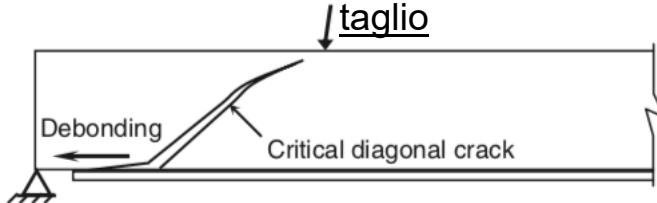


Il distacco si origina in corrispondenza di una fessura flessionale (o di taglio-flessionale) nella regione ad alto momento, per poi propagarsi verso una delle estremità del rinforzo.

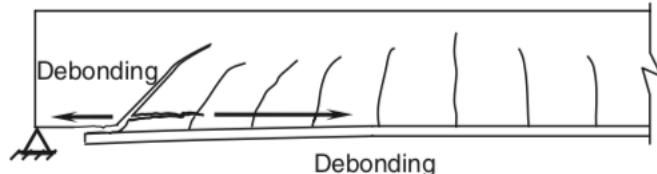
N.B. Questi meccanismi sono essenzialmente fragili e si manifestano in modo improvviso.

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

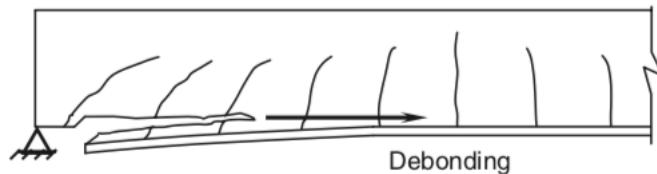
Distacco da fessurazione diagonale da taglio



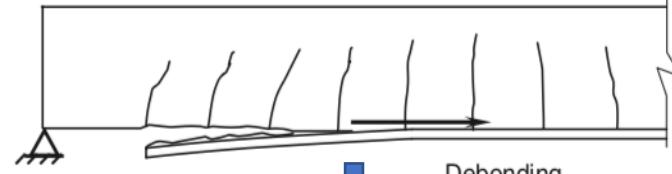
Distacco da fessurazione diagonale da taglio con asportazione copriferro



Distacco per separazione del copriferro



Distacco di estremità

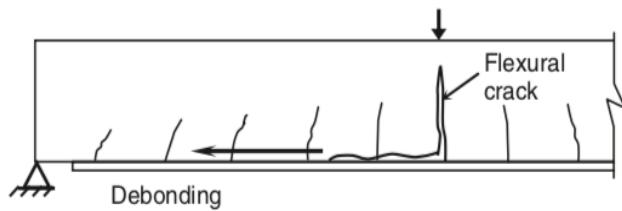


La perdita di aderenza si origina all'estremità del rinforzo o in prossimità di essa per poi propagarsi verso la mezzeria della trave.

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

Rotture fragili per perdita di aderenza

Distacco intermedio causato da fessure da flessione

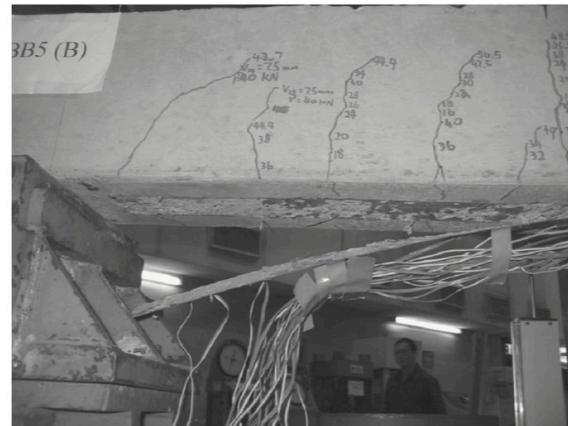
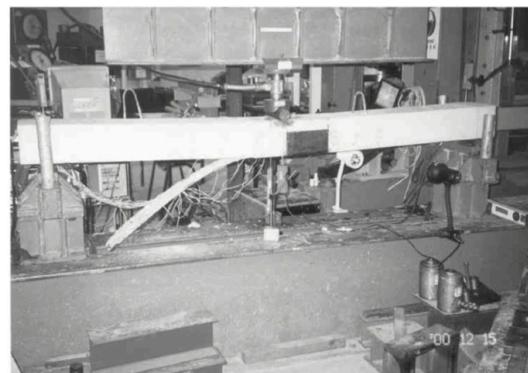


Distacco di estremità



Questi due meccanismi risultano essere i più frequenti.

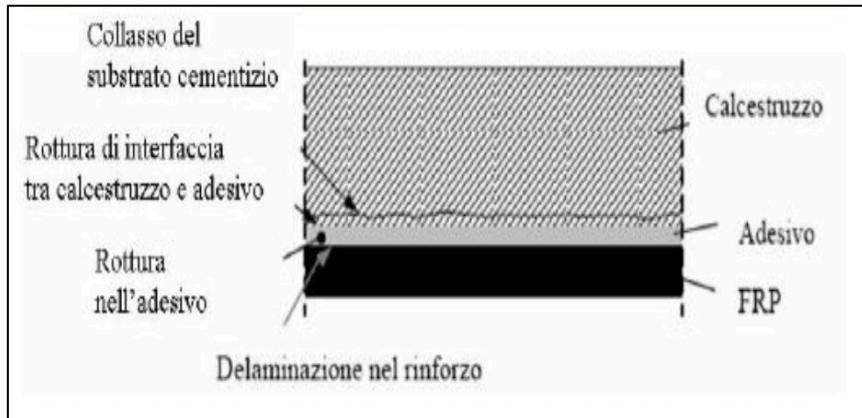
Per mitigare il rischio di evenienza degli altri modi di crisi generalmente si procede con l'accertamento preventivo delle condizioni del supporto e ad un'adeguata preparazione del substrato.



Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

Meccanismi di rottura fragili per perdita di aderenza

Negli interventi di rinforzo di elementi di calcestruzzo mediante lamine o tessuti di materiale FRP il **ruolo dell'aderenza tra calcestruzzo e composito assume grande importanza** in quanto il **meccanismo di rottura per distacco dal supporto è di tipo fragile**. Nello spirito del criterio di gerarchia delle resistenze tale meccanismo di crisi non deve precedere il collasso per flessione o per taglio dell'elemento rinforzato.



In linea di principio il distacco del composito dal supporto può prodursi all'interno dell'adesivo, tra calcestruzzo ed adesivo, nel calcestruzzo o all'interno del rinforzo (ad esempio tra strati sovrapposti di composito).

Nel caso di rinforzi posti correttamente in opera, poiché la resistenza a taglio dell'adesivo è in genere molto più elevata di quella del calcestruzzo, **la rottura si produce all'interno di quest'ultimo con asportazione di uno strato di materiale di spessore variabile da pochi millimetri fino ad interessare l'intero copriferro**.

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

Calcolo capacità resistente a flessione

Il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP in modo che il momento sollecitante di progetto, M_{Sd} , e quello resistente di progetto della sezione rinforzata, M_{Rd} , soddisfino la disequazione (par. 4.2.2.1 CNR-DT 200 R1/2013):

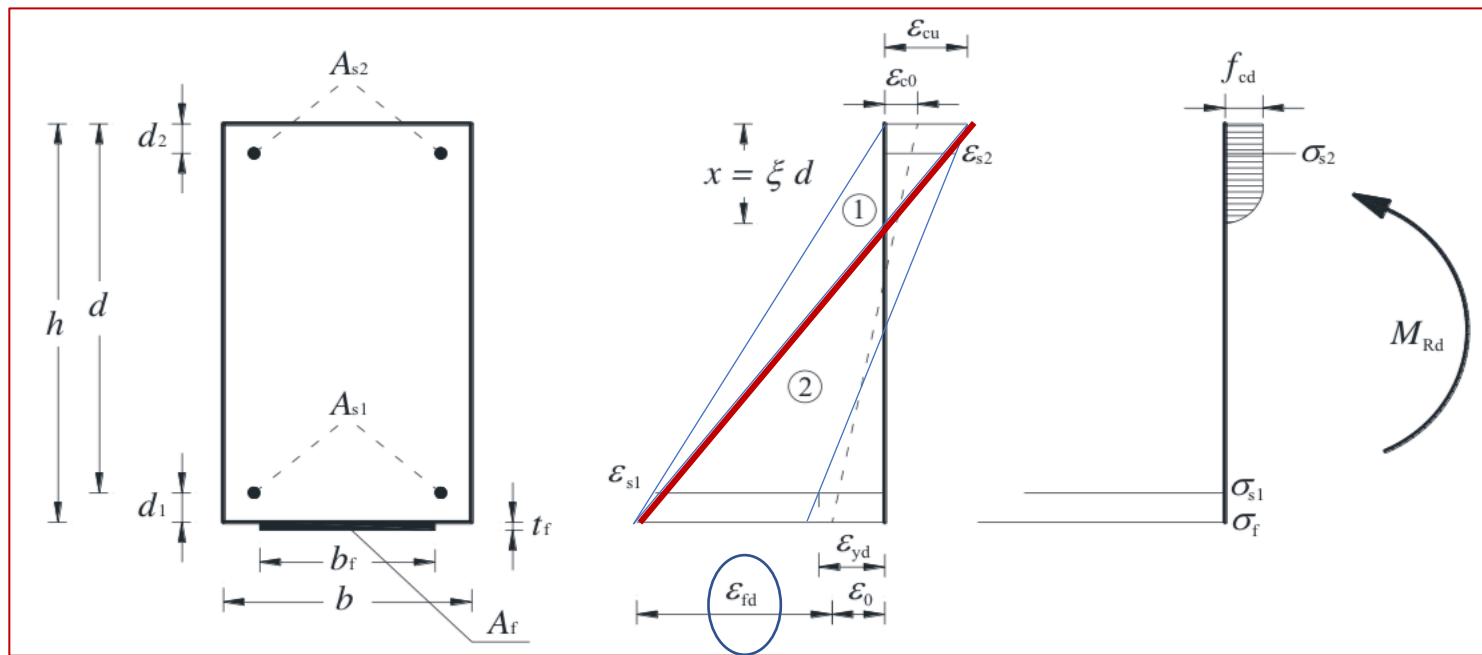
$$M_{Sd} \leq M_{Rd}$$

Si assumono le seguenti ipotesi:

- 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, FRP-calcestruzzo);
- incapacità del calcestruzzo di resistere a sforzi di trazione;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

L'intervento di rinforzo risulta efficace per sezioni a debole armatura (**acciaio tesò snervato allo SLU**).

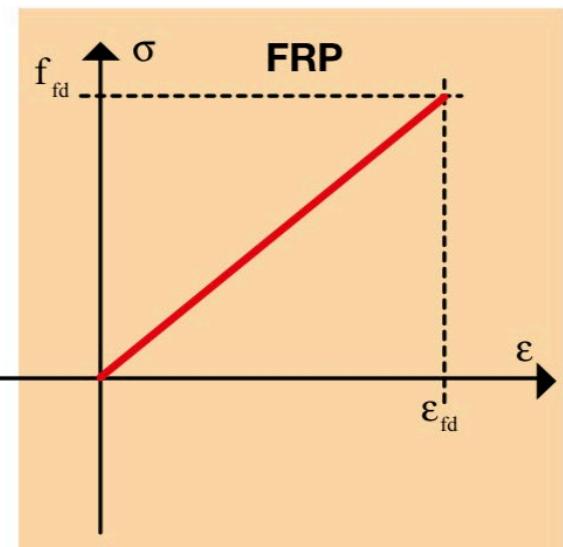
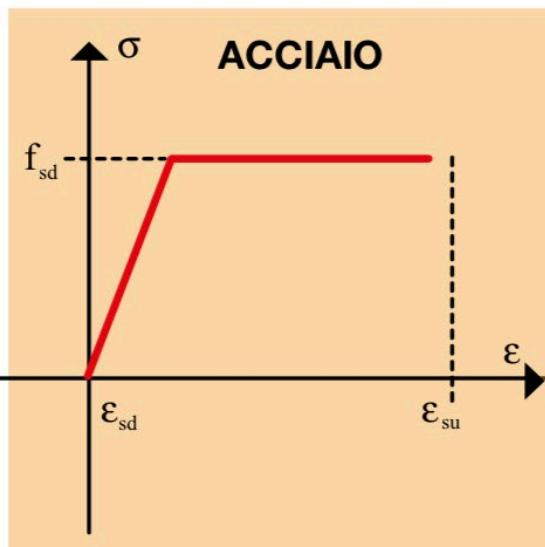
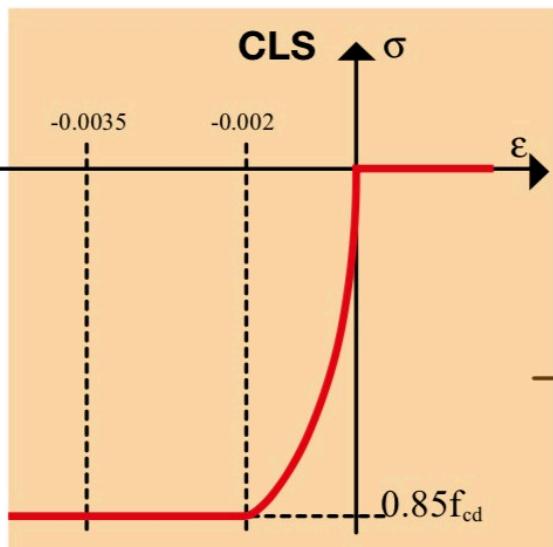
Rinforzo a flessione di una trave in c.a.



Con riferimento alla situazione esemplificativa rappresentata in Figura (par. 4.2.2.3 CNR-DT 200 R1/2013), si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la **massima dilatazione del rinforzo di FRP** (zona 1) o la **massima contrazione del calcestruzzo** (zona 2).

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

LEGAMI COSTITUTIVI MATERIALI:



Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

La verifica allo SLU per flessione di elementi rinforzati con FRP è analoga a quella della sezione in c.a. (si basa su semplici considerazioni di equilibrio).

Si ipotizza che la rottura possa avvenire (par. 4.2.2.1 CNR-DT 200 R1/2013):

- per cedimento del calcestruzzo a compressione ovvero raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso, ε_{cu} ;
- per cedimento del rinforzo a trazione o per delaminazione ovvero raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP, ε_{fd} , pari a:

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd} \right\}$$

ε_{fk} è la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo
 ε_{fdd} è la deformazione massima per delaminazione intermedia

γ_f e η_a sono i coefficienti definiti nelle Tabelle che seguono.

Tipo di collasso	Coefficiente parziale	Applicazione tipo A ⁽¹⁾	Applicazione tipo B ⁽²⁾
Rottura	γ_f	1.10	1.25
Delaminazione	$\gamma_{f,d}$	1.20	1.50

⁽¹⁾ Sistemi di rinforzo certificati
⁽²⁾ Sistemi di rinforzo non certificati

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

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

Resistenza allo stato limite ultimo per distacco intermedio (par. 4.1.4 CNR-DT 200 R1/2013)

$$\varepsilon_{\text{fdd}} = \frac{f_{\text{fdd},2}}{E_f} \geq \varepsilon_{sy} - \varepsilon_0$$

dove ε_{sy} è la deformazione di calcolo dell'armatura preesistente in corrispondenza dello snervamento, ottenuta a partire dalla corrispondente tensione media divisa per il fattore di confidenza FC, ed ε_0 è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo tesò.

$$f_{\text{fdd},2} = \frac{k_q}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{E_f}{t_f} \cdot \frac{2 \cdot k_b \cdot k_{G,2}}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}}}$$

f_{cm} e f_{ctm} sono, rispettivamente, i valori medi delle resistenze a compressione ed a trazione del calcestruzzo valutate in situ; in mancanza di dati sperimentali, la resistenza media a trazione del calcestruzzo può essere dedotta dalla f_{cm} in accordo con quanto indicato nella Normativa vigente;

k_b è un coefficiente correttivo di tipo geometrico funzione del rapporto b_f/b tra la larghezza del rinforzo e quella dell'elemento rinforzato:

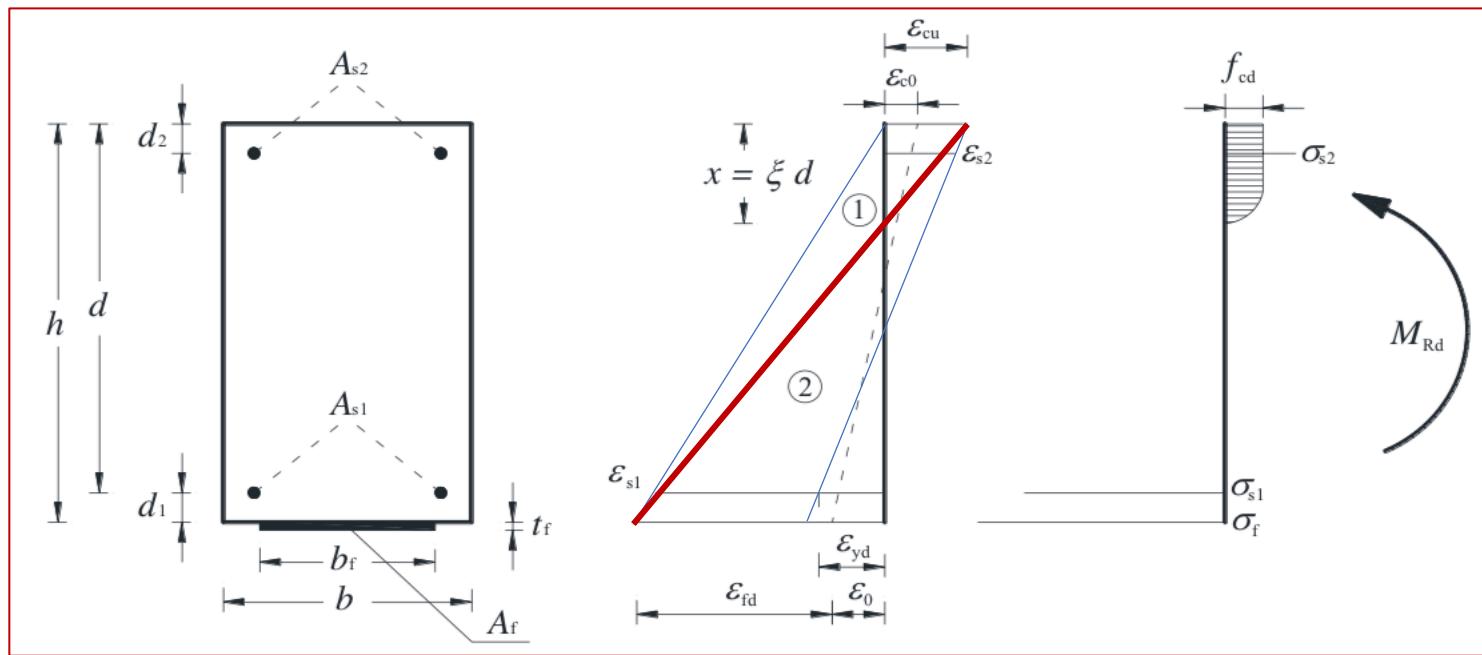
$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f/b}{1 + b_f/b}} \geq 1$$

sempreché risulti $b_f/b \geq 0.25$ (per $b_f/b < 0.25$ al coefficiente k_b viene attribuito il valore 1.18, corrispondente a $b_f/b = 0.25$);

$k_{G,2}$ è un coefficiente correttivo calibrato sulla base di risultati di prove sperimentali = 0.10 mm

k_q è un coefficiente che tiene conto della condizione di carico, da assumersi pari a 1.25 per prevalenti carichi distribuiti e 1 in tutti gli altri casi.

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.



Con riferimento alla situazione esemplificativa rappresentata in Figura (par. 4.2.2.3 CNR-DT 200 R1/2013), si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la **massima dilatazione del rinforzo di FRP** (zona 1) o la **massima contrazione del calcestruzzo** (zona 2).

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

Nella zona 1 la rottura si attinge per **raggiungimento della deformazione elastica limite di progetto nelle fibre**: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione delle fibre, ε_{fd} (par. 4.2.2.3 CNR-DT 200 R1/2013)

Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, possono essere calcolate, tramite la linearità del diagramma, attraverso le seguenti relazioni:

- (FRP) $\varepsilon_f = \varepsilon_{fd},$
- (calcestruzzo al lembo compresso) $\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \varepsilon_{cu},$
- (acciaio in compressione) $\varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)},$
- (acciaio in trazione) $\varepsilon_{s1} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)},$

Poichè generalmente il rinforzo di FRP viene applicato su una struttura già sollecitata si deve tener conto dello **stato di deformazione già raggiunto dalla trave al momento del rinforzo ($\varepsilon_{co}, \varepsilon_o$)**.

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

Nella zona 2 la rottura avviene per **schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato**, mentre la deformazione limite delle fibre non è stata ancora raggiunta: in tal caso resta fissata la deformazione massima del calcestruzzo compresso, ε_{cu} , in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali (par. 4.2.2.3 CNR-DT 200 R1/2013):

- | | |
|-------------------------------------|---|
| - (FRP) | $\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} \cdot (h - x) - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fd},$ |
| - (calcestruzzo al lembo compresso) | $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu},$ |
| - (acciaio in compressione) | $\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x},$ |
| - (acciaio in trazione) | $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}.$ |

Poichè generalmente il rinforzo di FRP viene applicato su una struttura già sollecitata si deve tener conto dello **stato di deformazione già raggiunto dalla trave al momento del rinforzo (ε_{co} , ε_o)**.

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

Le due equazioni da utilizzare per la risoluzione del problema sono derivanti da (par. 4.2.2.3 CNR-DT 200 R1/2013):

- equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave:

$$0 = \psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f \quad \rightarrow \text{POSIZIONE ASSE NEUTRO}$$

- equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese e parallelo all'asse neutro:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (d - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (d - d_2) + A_f \cdot \sigma_f \cdot d_1]$$

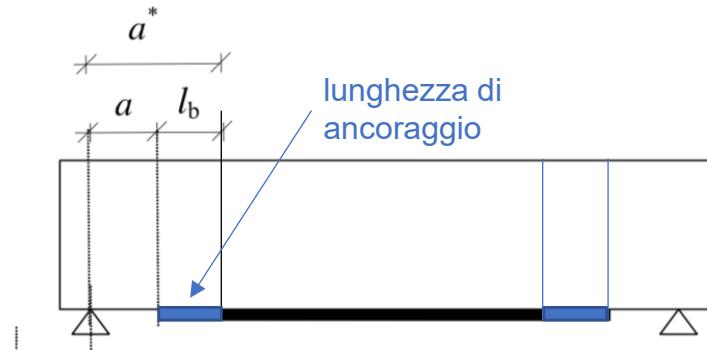
($\gamma_{Rd} = 1$ i coefficienti adimensionali ψ e λ rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a $b \cdot x \cdot f_{cd}$ ed a x ($\psi = 0.8$; $\lambda = 0.4$) .

Poichè 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.

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

Verifica dell'ancoraggio

Un'attenzione particolare va dedicata per scongiurare il collasso per distacco di estremità; bisogna, infatti, verificare che **la tensione nel composito**, nella sezione dalla quale si rende necessario il rinforzo per la resistenza a flessione dell'elemento, **non superi il massimo valore ammissibile nei riguardi del fenomeno di distacco di estremità** (par. 4.2.2.5 CNR-DT 200 R1/2013).

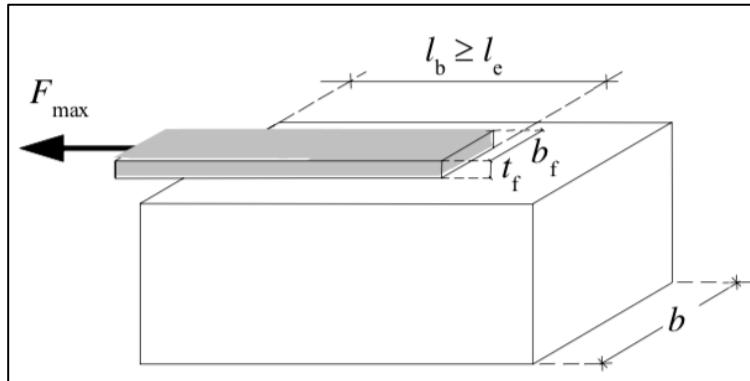


Tale valore massimo è funzione della **lunghezza della zona di ancoraggio**, a sua volta dipendente dalla distanza a^* della summenzionata sezione dall'appoggio.

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

Verifica dell'ancoraggio

La verifica di sicurezza allo SLU nei confronti della crisi per distacco dal supporto richiede la valutazione della **massima forza trasmissibile dal calcestruzzo al rinforzo** (par. 4.1.2 CNR-DT 200 R1/2013).



Con riferimento ad una tipica prova di aderenza, il valore ultimo della **forza sopportabile dal rinforzo di FRP**, prima che subentri il distacco dal supporto, dipende, a parità di tutte le altre condizioni, dalla lunghezza, l_b , della zona incollata.

Tale valore cresce con l_b fino ad attingere un massimo corrispondente ad una ben definita lunghezza, l_e : ulteriori allungamenti della zona di incollaggio non comportano incrementi della forza trasmessa.

l_e = **lunghezza ottimale di ancoraggio**. È la **lunghezza minima di ancoraggio che assicura la trasmissione del massimo sforzo di aderenza**.

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

Verifica dell'ancoraggio

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

LUNGHEZZA OTTIMALE DI
ANCORAGGIO DI PROGETTO
(par. 4.1.2 CNR-DT 200 R1/2013)

- E_f e t_f sono, rispettivamente, il modulo di elasticità normale nella direzione della forza e lo spessore del composito fibrorinforzato;
- Γ_{Fd} è il valore di progetto dell'energia specifica di frattura;
- f_{bd} è la tensione tangenziale di aderenza, valutabile con $f_{bd} = \frac{2\Gamma_{Fd}}{s_u}$ con $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto;
- γ_{Rd} è un coefficiente correttivo pari a 1.25

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

Verifica dell'ancoraggio

$$I_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}}$$

VALORE DI PROGETTO DELL'ENERGIA
SPECIFICA DI FRATTURA
(par. 4.1.2 CNR-DT 200 R1/2013)

- f_{cm} e f_{ctm} sono, rispettivamente, i valori medi delle resistenze a compressione ed a trazione del calcestruzzo valutate in situ; in mancanza di dati sperimentali, la resistenza media a trazione del calcestruzzo può essere dedotta dalla f_{cm} in accordo con quanto indicato nella Normativa vigente;
- FC è un opportuno fattore di confidenza;
- k_b è un coefficiente correttivo di tipo geometrico ed ammette la seguente espressione in funzione del rapporto b_f/b tra la larghezza del rinforzo e quella dell'elemento rinforzato:

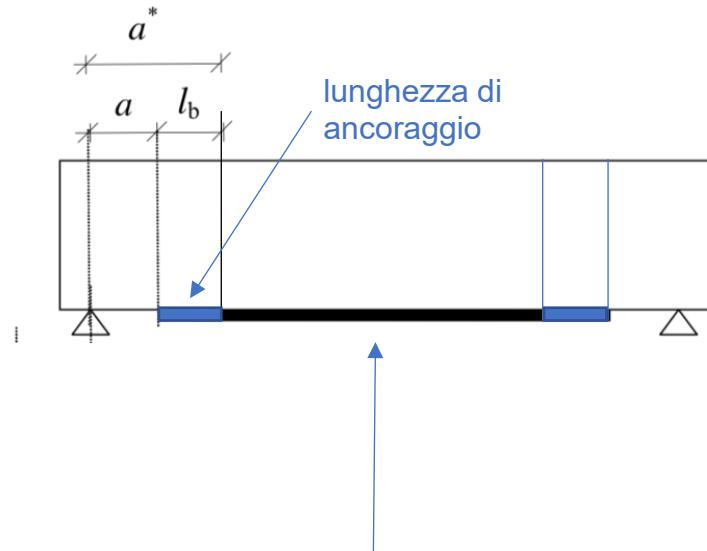
$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f/b}{1 + b_f/b}} \geq 1$$

sempreché risultati $b_f/b \geq 0.25$ (per $b_f/b < 0.25$ al coefficiente k_b viene attribuito il valore 1.18, corrispondente a $b_f/b = 0.25$);

- k_G è un ulteriore coefficiente correttivo tarato sulla base di risultati di prove sperimentali, da assumersi pari 0.023 mm per i compositi preformati ed a 0.037 mm per i compositi impregnati in situ.

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

Verifica dell'ancoraggio



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

Per $a^* \geq l_{ed}$ è suggerito di prevedere una lunghezza di ancoraggio $l_b \geq l_{ed}$. Il massimo valore ammissibile per la tensione di trazione nel composito nei riguardi del fenomeno di distacco di estremità è f_{fdd} .

Per $a^* < l_{ed}$ è inevitabile che sia $l_b < l_{ed}$. In questo caso, il massimo valore ammissibile per la tensione di trazione nel composito nei riguardi del fenomeno di distacco di estremità è $f_{fdd,rid}$ (par. 4.2.2.5 CNR-DT 200 R1/2013).

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

Verifica dell'ancoraggio

Nell'ipotesi che il distacco coinvolga i primi strati di calcestruzzo e che le lunghezze di ancoraggio siano maggiori o uguali di quella ottimale, **la tensione di progetto del sistema di rinforzo, f_{fdd} , ovvero il valore della massima tensione alla quale il composito può lavorare senza che si verifichi il distacco di estremità**, è pari a (par. 4.1.2 CNR-DT 200 R1/2013):

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

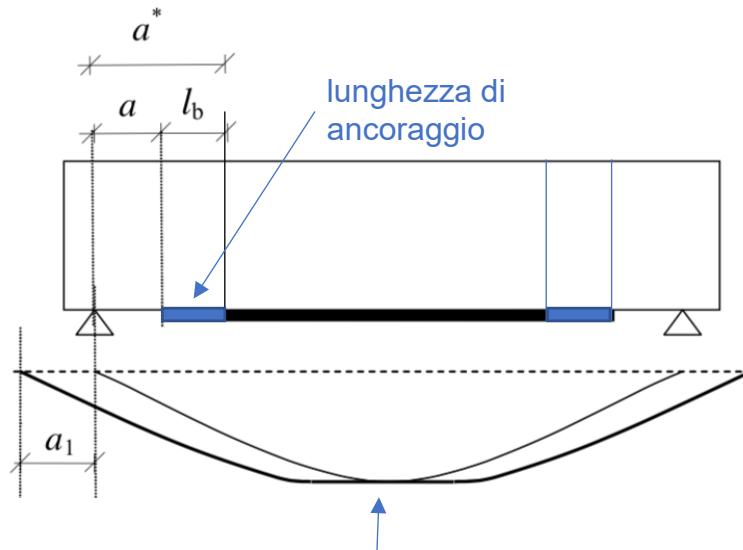
$\gamma_{f,d} = 1.2 \div 1.5$ = coefficiente parziale per FRP con riferimento allo Stato Limite Ultimo di distacco dal supporto

Nel caso di lunghezze di ancoraggio, l_b , minori di quella ottimale, l_{ed} , la tensione di progetto deve essere opportunamente ridotta in accordo con la relazione:

$$f_{fdd,rid} = f_{fdd} \cdot \frac{l_b}{l_{ed}} \cdot \left(2 - \frac{l_b}{l_{ed}} \right)$$

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

Verifica dell'ancoraggio



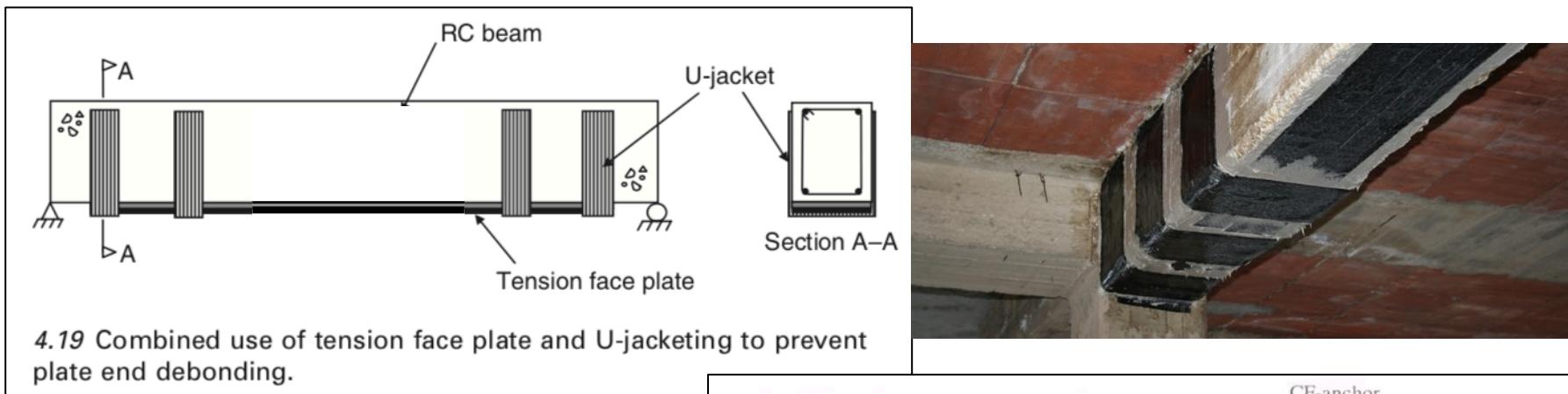
Per tener conto della possibilità di fessure inclinate per taglio, si deve applicare la **traslazione del diagramma del momento** di una quantità pari a $a_t = 0.9 \cdot d \cdot (1 - \cotg \alpha)$, con α inclinazione dell'armatura d'anima (par. 4.2.2.5 CNR-DT 200 R1/2013).

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

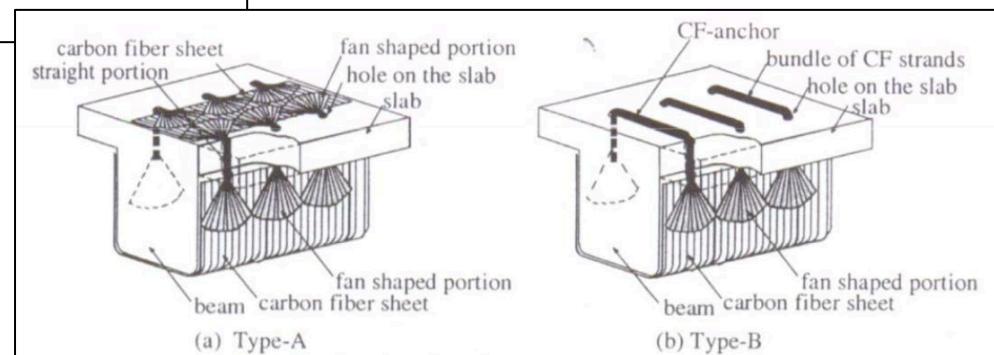
La verifica della lunghezza di ancoraggio può essere omessa (par. 4.2.2.5 CNR-DT 200 R1/2013) a patto di utilizzare sistemi tecnologici speciali per l'ancoraggio delle estremità delle lame (a condizione di disporre di un'opportuna certificazione di tali dispositivi basata su adeguate indagini sperimentali).

Possibili sistemi di ancoraggio (si possono usare certificandone la validità):

- Nastri FRP ad U incollati all'estremità della trave(U-jacket) + Connettori a fiocco FRP.



UTIL ANCHE COME RINFORZO A TAGLIO
E COME PRESIDI ATTI A CONTRASTARE
LA PERDITA DI ADERENZA PER INSTABILITÀ



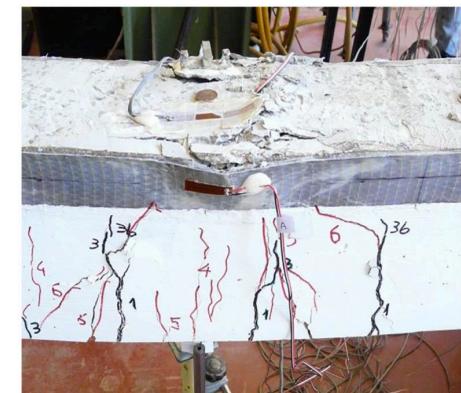
Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

Problema della delaminazione per instabilità a compressione

In presenza di momenti negativi alle estremità dell'elemento rinforzato, a meno di valutazioni più specifiche o di adozione di dispositivi speciali d'ancoraggio, è consigliato di limitare l'applicazione del composito FRP alla sola zona soggetta a momento positivo.



Problema della delaminazione per instabilità a compressione dell'FRP

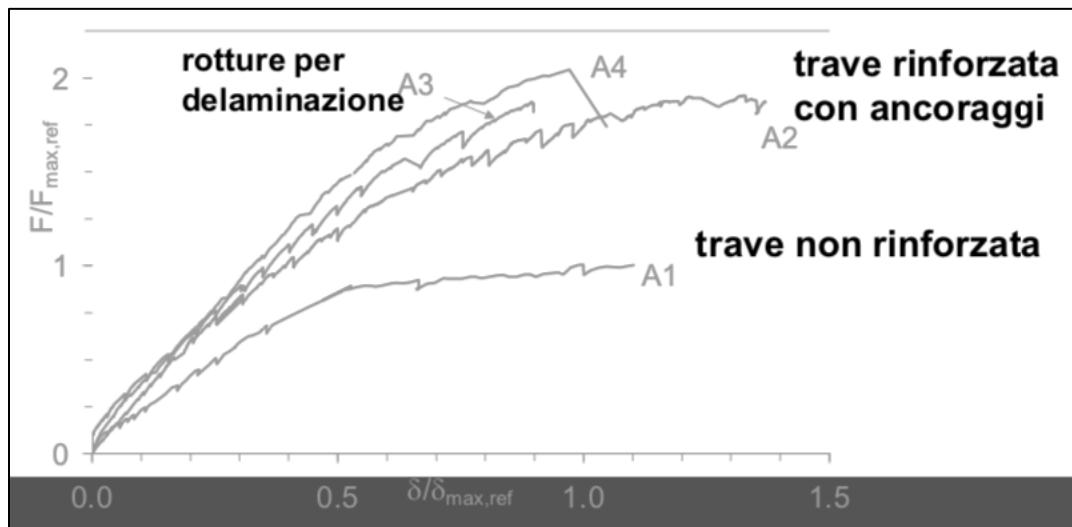


L'incollaggio di FRP in zona compressa deve essere analizzato e progettato con estrema cura, prevedendo degli **opportuni presidi atti a limitare la lunghezza di libera inflessione del rinforzo (fasciature U-jacket e connettori – vedi slide precedente)**

Rinforzo a flessione di una trave in c.a.

Duttilità

- **Capacità di deformazione in campo plastico:** dipende sia dal comportamento della sezione, sia dalle modalità effettive di collasso dell'elemento.
- **Per la sezione si ottiene un comportamento tanto più duttile quanto più l'armatura metallica tesa è snervata e quanto più è elevata la curvatura dell'elemento. Si ottiene un comportamento più duttile quando il collasso avviene per rottura a compressione del calcestruzzo.**
- La duttilità può ritenersi del tutto assente nel caso in cui il fenomeno di distacco del rinforzo di FRP dal supporto preceda lo snervamento dell'armatura metallica tesa.



Rinforzo a pressoflessione

Resistenza di progetto a flessione dell'elemento rinforzato con FRP in presenza di forza assiale (pressoflessione)

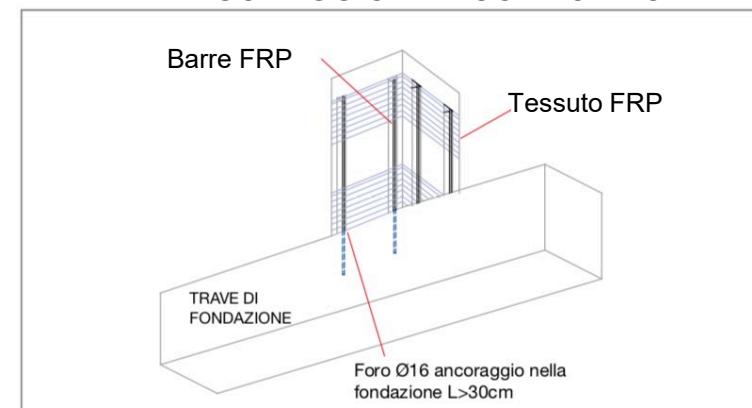
Valgono i principi e le regole di applicazione introdotti nel caso di flessione semplice, **tenendo conto della dipendenza del valore di progetto del momento resistente della sezione rinforzata, M_{Rd} , da quello dello sforzo normale sollecitante, N_{Sd}** (par. 4.2.2.4 CNR-DT 200 R1/2013).

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. Tale condizione può essere ottenuta, ad esempio, ricorrendo ad un confinamento trasversale (vedi slide successive).



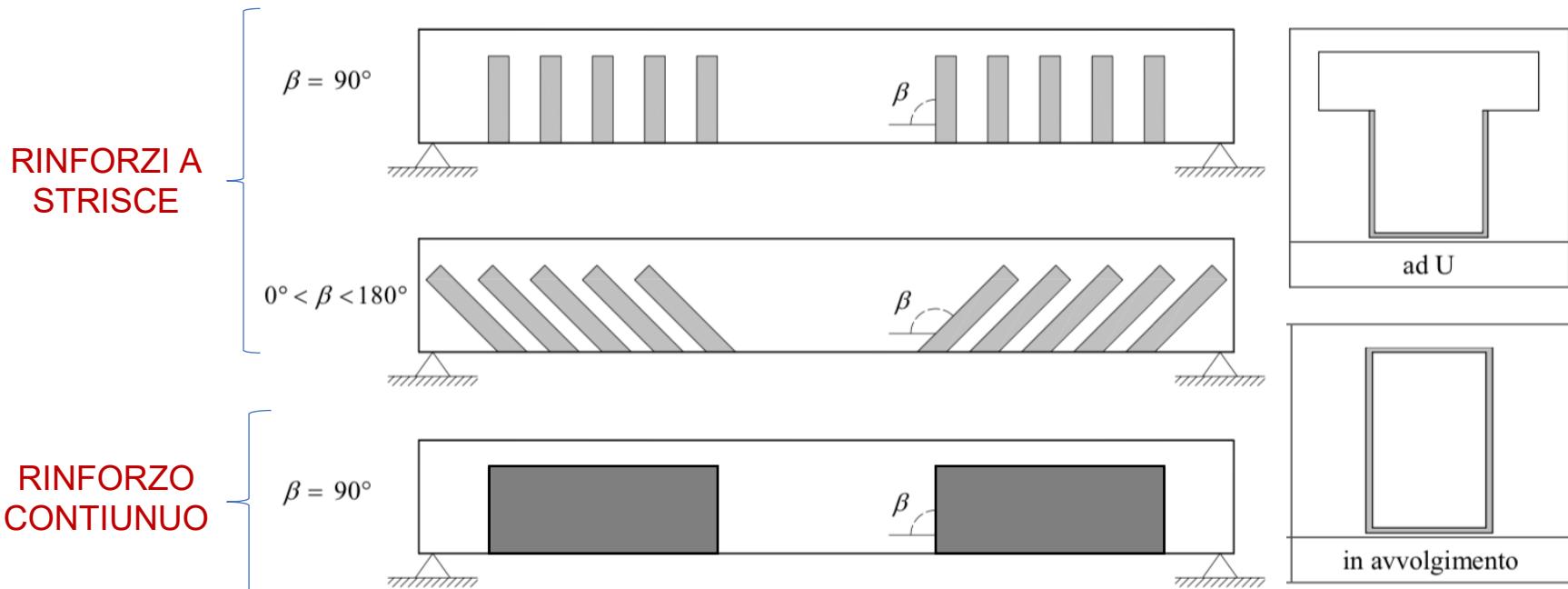
ANCORAGGIO DEL COMPOSITO



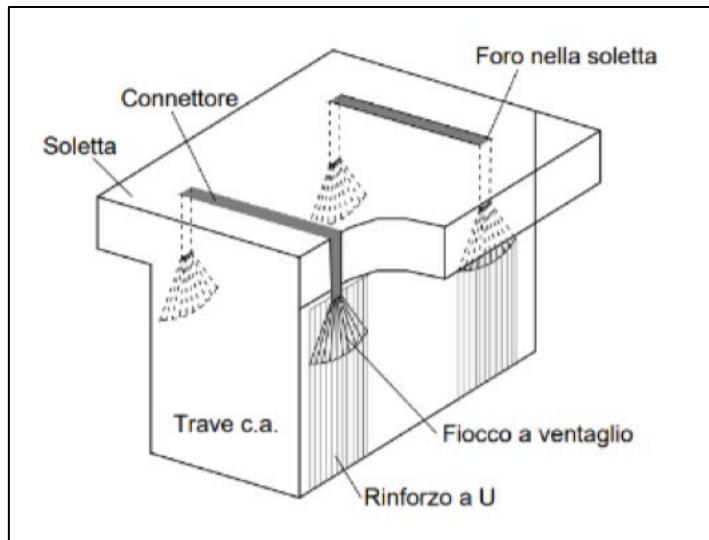
Rinforzo a taglio di una trave in c.a.

Configurazioni per il 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** (par. 4.3.2 CNR-DT 200 R1/2013).



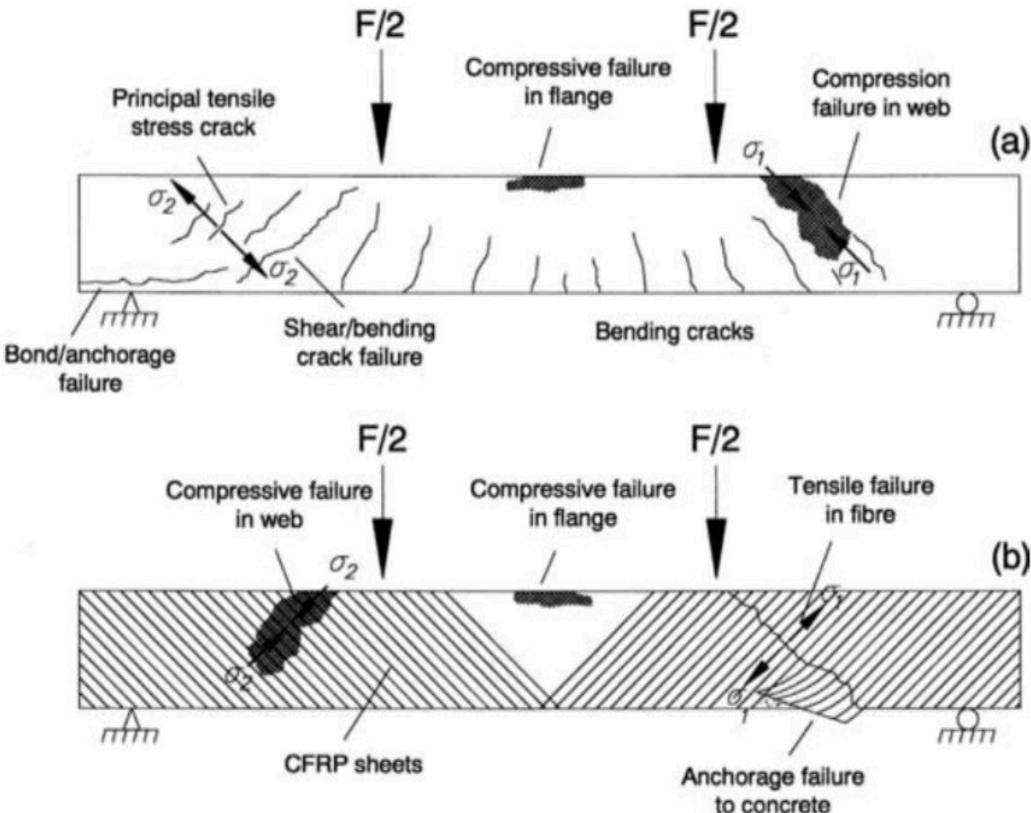
Rinforzo a taglio di una trave in c.a.



La disposizione a U richiede una particolare verifica dell'efficacia dell'ancoraggio dei nastri al corrente compresso della trave, per cui è necessario prevedere **opportuni dispositivi speciali**; fra questi si hanno dei sistemi meccanici di serraggio delle estremità dei nastri e solidarizzati all'intradosso della trave oppure **fiocchi in vetro/carbonio ancorati al corrente compresso mediante iniezione o avvolgimento**.



Possibili modalità di rottura



Rinforzo a taglio di una trave in c.a.

Il processo di rottura per taglio delle travi in cemento armato rinforzate con FRP comporta lo sviluppo di una singola fessura di taglio diagonale maggiore o di una serie di fessure di taglio diagonali, simili alle normali travi in cemento armato senza rinforzo con FRP.

Evidenze sperimentali sottolineano come la rottura in travi in c.a. rinforzate a taglio con FRP si verifichi in **due principali modalità di rottura: rottura per trazione dell'FRP e distacco dell'FRP dal calcestruzzo**.

In genere, entrambe le modalità di rottura iniziano con un processo di propagazione del distacco dalla fessura di taglio critica. La rottura per trazione inizia nella striscia FRP più sollecitata, seguita rapidamente dalla rottura di altre strisce FRP intersecate dalla fessura di taglio critica. Nelle travi la cui rottura avviene per distacco dell'FRP, la rottura comporta un processo di distacco sequenziale delle strisce FRP a partire dalla striscia più vulnerabile.

Un altro possibile meccanismo di rottura è lo **schiacciamento della biella compressa**.

Rinforzo a taglio di una trave in c.a.

Resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato con FRP

Il meccanismo del taglio è modellato con la schematizzazione a traliccio di Morsch. La **resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato** può essere valutata attraverso la seguente relazione (par. 4.3.3.1 CNR-DT 200 R1/2013). :

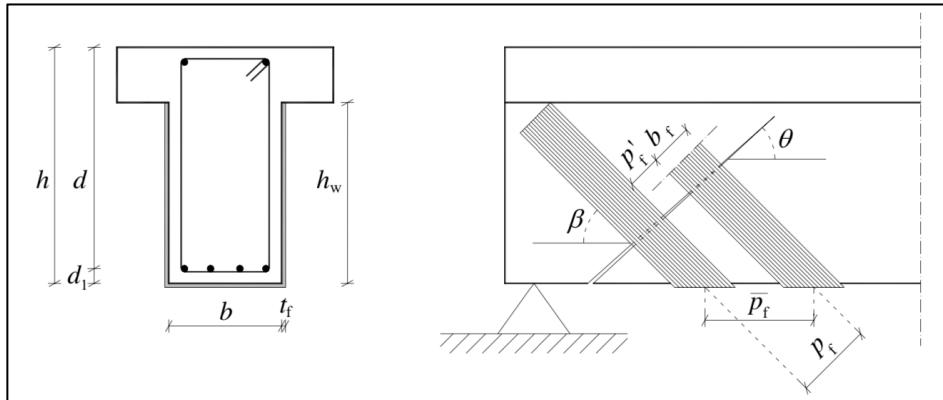
$$V_{Rd} = \min \left\{ V_{Rd,s} + V_{Rd,f}, V_{Rd,c} \right\}$$

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.

Il rinforzo a taglio eseguito con tessuti in FRP non fa altro che **aggiungere alla resistenza a Taglio-Trazione** delle staffe il contributo di resistenza dovuto alla presenza del rinforzo in FRP. In pratica rinforzare un elemento in cemento armato a taglio equivale ad incrementare la sua armatura trasversale. Di conseguenza il contributo della resistenza a taglio-trazione aumenterà.

Rinforzo a taglio di una trave in c.a.



Contributo del sistema di rinforzo FRP (par. 4.3.3.1 CNR-DT 200 R1/2013):

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

disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare

dove d è l'altezza utile della sezione, f_{fed} è la resistenza efficace del sistema di rinforzo, t_f è lo spessore del composito, b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo dei nastri (misurati in direzione perpendicolare alle fibre).

LIMITAZIONI GEOMETRICHE:

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:

$$50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$$

$$b_f \leq p_f \leq \min\{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$$

Rinforzo a taglio di una trave in c.a.

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco di estremità del composito dal supporto. In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi della procedura semplificata basata sulla definizione di **“tensione efficace” del sistema di rinforzo**, intesa come la **tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto**.

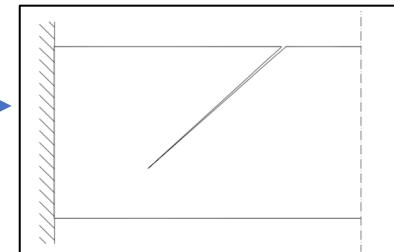
RESISTENZA EFFICACE DI CALCOLO DEL RINFORZO (par. 4.3.3.2 CNR-DT 200 R1/2013):

$$f_{\text{fed}} = f_{\text{fdd}} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{\text{ed}} \cdot \sin \beta}{\min \{ 0.9 \cdot d, h_w \}} \right]$$

disposizione ad U su una sezione rettangolare

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, 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.

N.B. Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la **zona compressa** è localizzata **inferiormente alla trave** (mensole, appoggi di continuità...). In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto. In tali situazioni diventa assolutamente necessario **utilizzare dispositivi di ancoraggio speciali** per garantire un efficace collegamento dei nastri con il corrente tesio superiore, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici.



Rinforzo a taglio di una trave in c.a.

RESISTENZA EFFICACE DI CALCOLO DEL RINFORZO (par. 4.3.3.2 CNR-DT 200 R1/2013):

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

disposizione in
avvolgimento
su una sezione
rettangolare

dove f_{fdd} è la tensione di progetto del sistema di rinforzo; ed inoltre

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

essendo r_c il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata, b la larghezza dell'anima della sezione. Nell'equazione riportata sopra il contributo del secondo termine va considerato solo se positivo.

Rinforzo a taglio di una trave in c.a.

OSSERVAZIONE 1

Quando la crisi per taglio avviene per **rottura della biella compressa di calcestruzzo**, il rinforzo a taglio con FRP risulta essere praticamente inefficace perché la resistenza a taglio sarà governata dalla biella compressa di calcestruzzo.

Una situazione del genere può verificarsi per un elemento esistente che è dotato già di una discreta armatura a taglio. Solitamente ciò non accade in strutture esistenti datate, di solito caratterizzate da armature a taglio ad ampio passo. Potrebbe accadere in casi di rinforzo di strutture esistenti progettate con Norme Tecniche recenti (NTC2008, 2018) per un incremento dei carichi ad esempio a seguito a cambi di destinazione d'uso.

OSSERVAZIONE 2

ATTENZIONE ALLA GERARCHIA DELLE RESISTENZE.

Nel caso di progetto di un rinforzo a flessione con FRP, è necessario andare a verificare che sia soddisfatta anche la verifica a taglio, anche se prima del rinforzo la verifica a taglio risultava già soddisfatta.

Occorre tenere presente che un rinforzo a flessione con FRP, andrà ad apportare alla trave, un maggiore momento resistente che si traduce (nell'ambito dell'applicazione della gerarchia delle resistenze) in una maggiore sollecitazione tagliente per la trave. Di conseguenza l'incremento della sollecitazione a taglio può far andare in crisi l'elemento.

Per questo motivo, spesso risulta necessaria l'applicazione di un rinforzo a taglio, come diretta conseguenza del rinforzo a flessione.

Confinamento

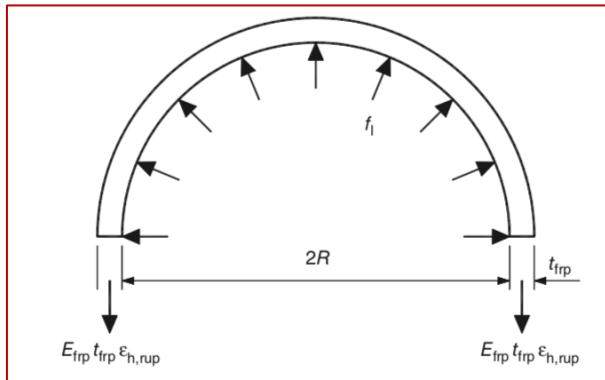


Il confinamento di elementi in calcestruzzo armato può portare ad un buon **incremento della capacità portante** e ad un significativo **aumento della duttilità**. Il confinamento può essere realizzato utilizzando compositi fibrorinforzati in avvolgimento perimetrale dell'elemento strutturale.

Questo intervento consente di migliorare in maniera significativa la **capacità di rotazione plastica delle sezioni di estremità di travi e pilastri**.

A differenza della tecnica di incamiciatura in c.a., non apporta nessun incremento significativo delle sezioni e quindi **NON** andiamo ad aumentare la rigidezza, ma agiamo andando ad aumentare la resistenza (in determinati casi di sollecitazione), ma soprattutto la capacità deformativa e, di conseguenza, la duttilità.

Confinamento

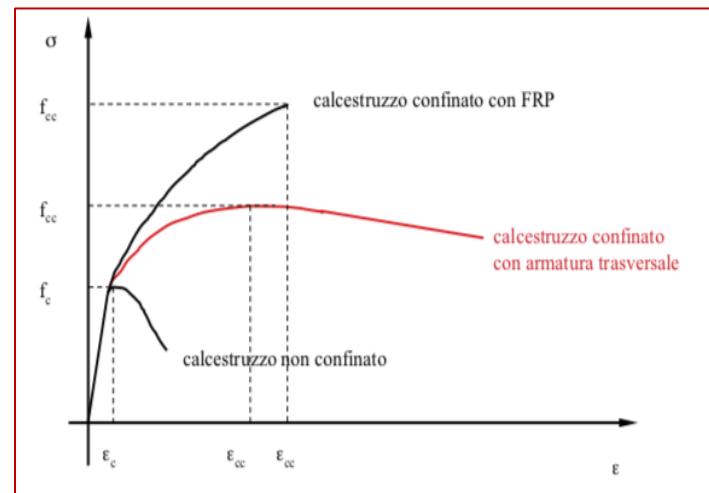


Con la fasciatura si crea un'azione di **confinamento** che permette di incrementare la resistenza a compressione globale dell'elemento strutturale. L'effetto è **analogo alla cerchiatura dei pilastri con staffe trasversali o con armatura a spirale**.

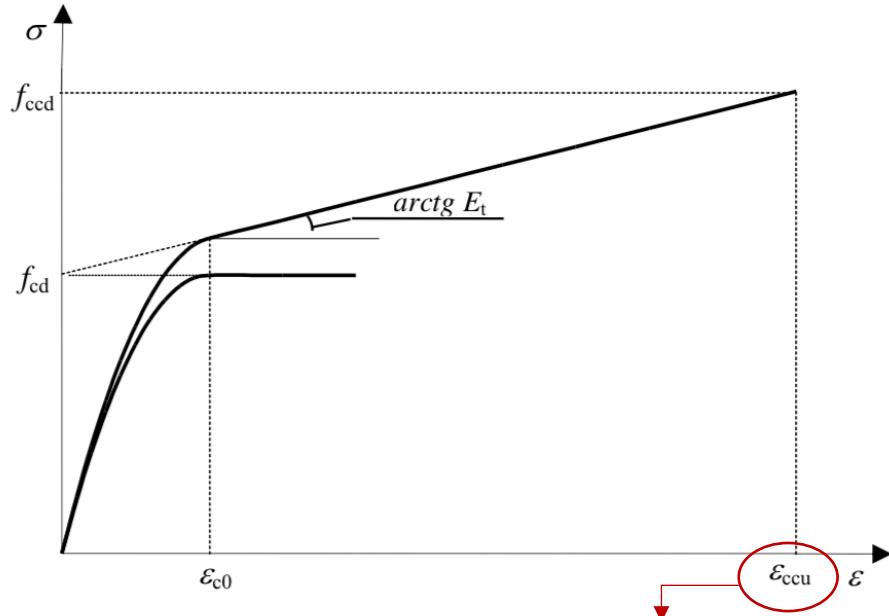
L'incremento della resistenza a compressione e della corrispondente deformazione ultima del calcestruzzo confinato con FRP dipendono dalla pressione di confinamento applicata. Quest'ultima è funzione della rigidezza del sistema di rinforzo e della forma della sezione trasversale dell'elemento confinato.

Un sistema confinante realizzato con FRP (elastico fino a rottura), a differenza di uno realizzato con acciaio (elasto-plastico), esercita una pressione laterale strettamente crescente all'aumentare della dilatazione trasversale dell'elemento confinato.

Il collasso dell'elemento confinato si raggiunge per rottura del composito. Tuttavia, a partire da un certo valore della deformazione assiale, l'elemento confinato con FRP perde di fatto la propria funzionalità potendo assorbire solo modeste ed insignificanti sollecitazioni trasversali. **Il collasso dell'elemento confinato è convenzionalmente raggiunto quando si attinge una deformazione limite del composito pari allo 0.4%** (par. 4.5 CNR-DT 200 R1/2013).



Modello tensione-deformazione del calcestruzzo confinato con FRP (Appendice F CNR-DT 200 R1/2013):



deformazione ultima di progetto del calcestruzzo confinato

tratto parabolico:

$$\frac{f_c}{f_{cd}} = a \cdot \bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}^2 \quad \text{per } 0 \leq \bar{\varepsilon} \leq 1$$

tratto lineare:

$$\frac{f_c}{f_{cd}} = 1 + b \cdot \bar{\varepsilon} \quad \text{per } 1 \leq \bar{\varepsilon} \leq \frac{\varepsilon_{ccu}}{\varepsilon_{c0}}$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \quad a = 1 + \gamma, \quad b = \gamma - 1$$

$$\gamma = \frac{f_{cd} + E_t \cdot \varepsilon_{c0}}{f_{cd}}, \quad E_t = \frac{f_{ccd} - f_{cd}}{\varepsilon_{ccu}}$$

f_{cd} ed ε_{c0} sono, rispettivamente, la resistenza di progetto del calcestruzzo non confinato e la competente deformazione (generalmente assunta pari a 0.002)

Confinamento

Resistenza di progetto a compressione centrata o con piccola eccentricità dell'elemento confinato (par. 4.5.2 CNR-DT 200 R1/2013):

Per ottenere un efficace confinamento è buona norma disporre le fibre del composito in direzione perpendicolare all'asse dell'elemento. In presenza di **sforzo normale centrato o con piccola eccentricità**, un adeguato confinamento degli elementi di c.a. determina un **aumento di resistenza e di deformazione ultima**.

In assenza di una pretensione iniziale, il sistema di rinforzo FRP esercita un confinamento passivo sulla membratura compressa. **L'azione di confinamento diventa significativa nella fase di plasticizzazione, e quindi di fessurazione, dell'elemento rinforzato, a seguito della sua più vistosa dilatazione trasversale.**

Valore di progetto dell'azione assiale agente

$$N_{Sd} \leq N_{Rcc,d}$$

Valore di progetto della resistenza dell'elemento confinato

$$N_{Rcc,d} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot A_c \cdot f_{ccd} + A_s \cdot f_{yd}$$

Il confinamento risulta efficace se $f_{l,eff}/f_{cd} > 0.05$

$$\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} = 1 + 2.6 \cdot \left(\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}} \right)^{2/3}$$

f_{cd} = tensione di progetto del calcestruzzo non confinato
 $f_{l,eff}$ = pressione efficace di confinamento

γ_{Rd} è il coefficiente parziale da assumersi pari a 1.10
 A_c ed f_{ccd} sono, rispettivamente, l'area della sezione trasversale dell'elemento e la **tensione di progetto del calcestruzzo confinato**

A_s ed f_{yd} sono, rispettivamente, l'area e la tensione di progetto dell'armatura metallica presente.

Confinamento

Stima della pressione laterale di confinamento (par. 4.5.2.1 CNR-DT 200 R1/2013):

$$\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} = 1 + 2.6 \cdot \left(\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}} \right)^{2/3}$$

$$f_{l,eff} = k_{eff} \cdot f_l$$

k_{eff} è un coefficiente di efficienza (< 1), definito come rapporto fra il volume $V_{c,eff}$ di calcestruzzo efficacemente confinato ed il volume V_c dell'elemento di calcestruzzo, depurato da quello delle armature longitudinali (generalmente trascurabile).

$$f_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid}$$

pressione efficace di confinamento, funzione della forma della sezione e delle modalità di realizzazione dell'intervento,

$$k_{eff} = k_H \cdot k_V \cdot k_\alpha$$

k_H = coefficiente di efficienza orizzontale, dipende dalla forma della sezione.

k_V = coefficiente di efficienza verticale, dipende dallo sviluppo del confinamento lungo l'asse longitudinale dell'elemento rinforzato.

k_α = coefficiente di efficienza, legato all'inclinazione delle fibre.

ρ_f è la percentuale geometrica di rinforzo, dipendente, dalla forma della sezione e dal tipo di applicazione (confinamento continuo o discontinuo), E_f è il modulo di elasticità normale del materiale in direzione delle fibre, $\varepsilon_{fd,rid}$ è un'opportuna deformazione ridotta di calcolo del composito fibrorinforzato.

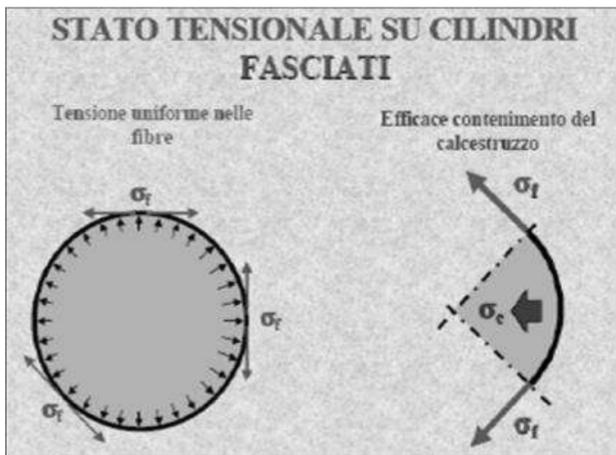
$$\varepsilon_{fd,rid} = \min \{ \eta_a \cdot \varepsilon_{fk} / \gamma_f; 0.004 \}$$

$$f_{l,eff} = k_{eff} \cdot f_l \rightarrow f_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid}$$

Sezioni circolari (par. 4.5.2.1.1 CNR-DT 200 R1/2013):

$$\rho_f = \frac{4 \cdot t_f \cdot b_f}{D \cdot p_f}$$

dove t_f e b_f sono, rispettivamente, lo spessore e l'altezza della generica striscia di FRP, p_f è il passo delle strisce e D è il diametro della sezione circolare.



L'intervento di confinamento con FRP risulta particolarmente efficace se adottato su elementi a sezione circolare soggetti a compressione centrale o con piccola eccentricità.

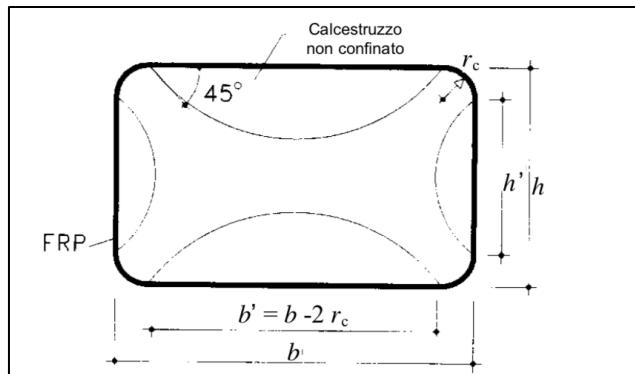
In presenza di fibre disposte in direzione trasversale all'asse longitudinale dell'elemento, il sistema di rinforzo induce sulla superficie di contatto una pressione laterale pressoché uniforme, che si oppone all'espansione radiale dell'elemento compresso.

$$f_{l,eff} = k_{eff} \cdot f_l \rightarrow f_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid}$$

Sezioni quadrate e rettangolari (par. 4.5.2.1.2 CNR-DT 200 R1/2013):

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot (b + h) \cdot b_f}{b \cdot h \cdot p_f}$$

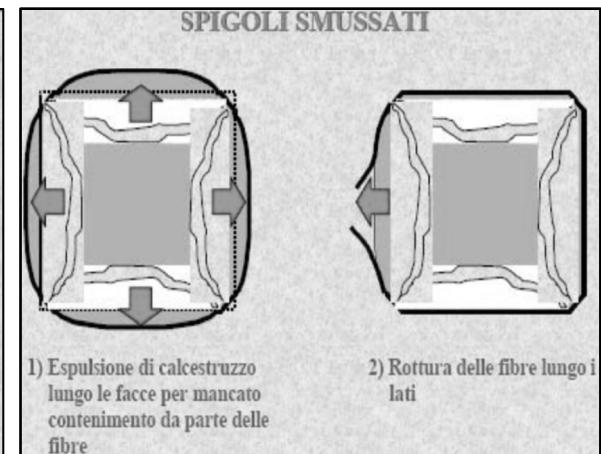
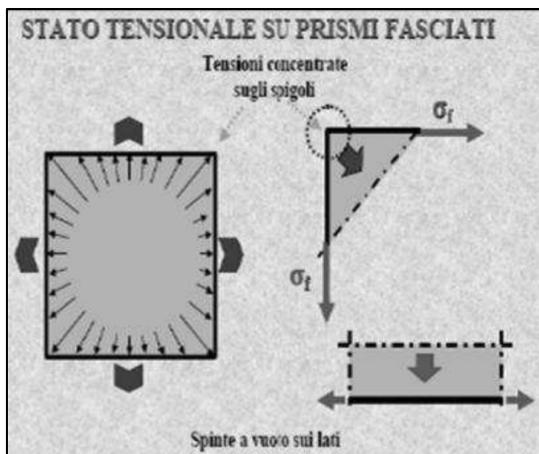
t_f , b_f = spessore e l'altezza della generica striscia di FRP
 p_f è il passo delle strisce
 b , h = dimensioni trasversali della sezione rettangolare



Il confinamento con FRP di elementi a sezione quadrata o rettangolare produce incrementi solo marginali della resistenza a compressione. Ne consegue che applicazioni di questo genere devono essere attentamente vagliate ed analizzate.

Si può ritenere, con buona approssimazione, che l'area di calcestruzzo effettivamente confinata sia solo un'aliquota di quella complessiva. La motivazione di tale comportamento è da attribuirsi all'"effetto arco" che si manifesta all'interno della sezione; tale effetto dipende dal valore del raggio di arrotondamento degli spigoli, r_c .

Sezioni quadrate e rettangolari



NOTA BENE:

1. In assenza di adeguate prove sperimentali, che ne comprovino al contrario l'efficacia, **non va considerato l'effetto del confinamento** su sezioni rettangolari per le quali $b/h > 2$, ovvero $\max\{b, h\} > 900\text{mm}$.
2. Eseguire sempre smussatura spigoli della sezione (= aumento area calcestruzzo confinato)

$$k_{\text{eff}} = k_H \cdot k_V \cdot k_\alpha$$

Coefficiente di efficienza legato all'inclinazione delle fibre:

$$k_\alpha = \frac{1}{1 + (\tan \alpha_f)^2}$$

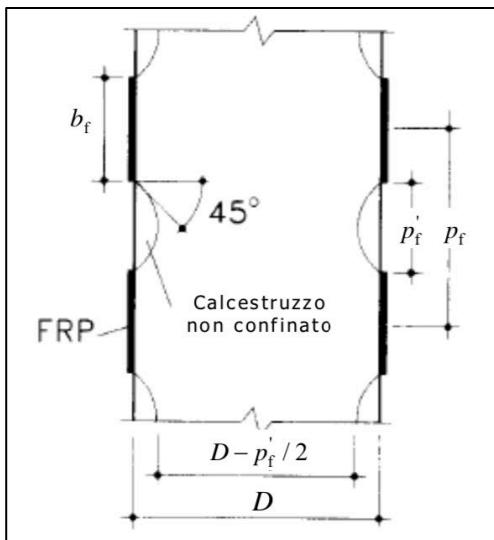
α_f = angolo di inclinazione delle fibre

Coefficiente di efficienza verticale:

1. In caso di fasciatura continua
2. In caso di fasciatura discontinua

$$\rightarrow k_V = 1$$

\rightarrow Si deve tenere conto della **riduzione di efficacia dovuta al fenomeno di diffusione delle tensioni tra due fasciature consecutive**. Per effetto di tale diffusione si creano delle zone che non risentono del confinamento, aventi approssimativamente in sezione verticale un contorno parabolico con tangente iniziale inclinata di 45°



$$k_V = \left(1 - \frac{p_f'}{2 \cdot d_{\min}} \right)^2$$

d_{\min} = minima dimensione trasversale dell'elemento

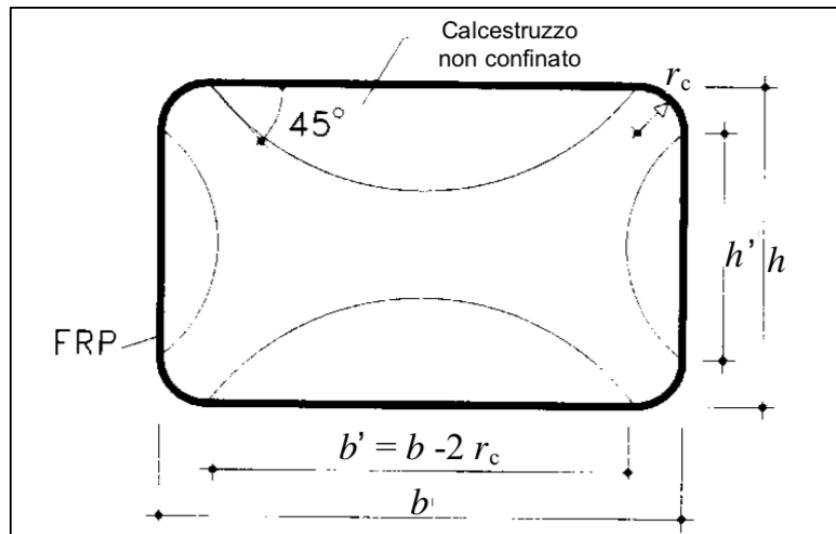
Nel caso di fasciatura discontinua è opportuno che la distanza netta fra le strisce rispetti la limitazione:

$$p_f' \leq d_{\min}/2$$

$$k_{\text{eff}} = k_H \cdot k_V \cdot k_\alpha$$

Coefficiente di efficienza orizzontale:

$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 \cdot A_g}$$



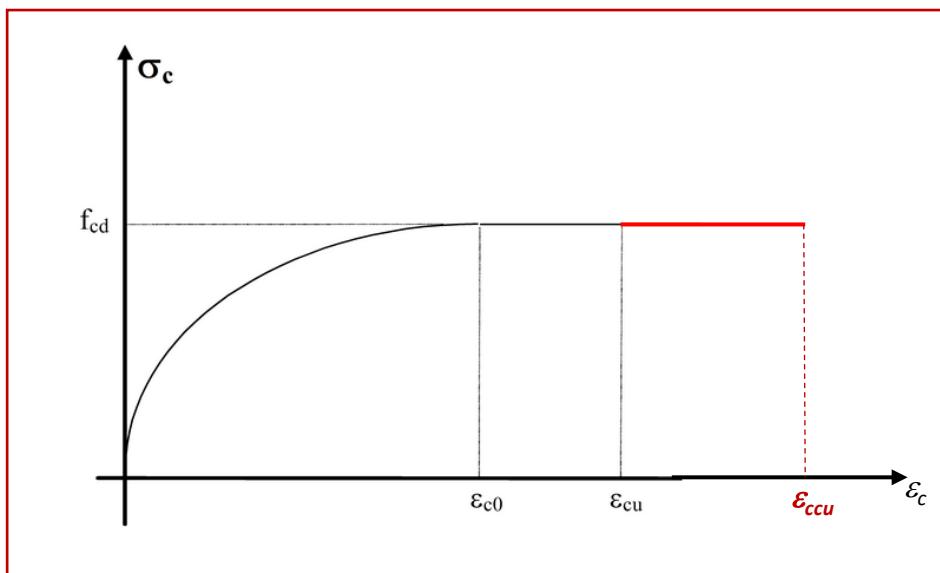
A_g = l'area della sezione trasversale dell'elemento confinato

Confinamento

Duttilità di elementi pressoinflessi confinati con FRP (par. 4.5.3 CNR-DT 200 R1/2013):

Il confinamento con FRP può essere previsto anche su elementi di calcestruzzo soggetti a pressoflessione (sforzo normale con grande eccentricità). In tal modo è possibile **incrementare la loro duttilità e, solo in misura ridotta, la loro resistenza**.

La curvatura ultima di una sezione pressoinflessa può essere valutata ipotizzando, per il calcestruzzo confinato, un classico **legame costitutivo del tipo parabola-rettangolo ed amplificando il valore della deformazione ultima, ε_{ccu}** .



$$\varepsilon_{ccu} = 0.0035 + 0.015 \cdot \sqrt{\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}}}$$

$$f_{l,eff} = k_{eff} \cdot f_l$$

$$f_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid}$$

$$\varepsilon_{fd,rid} = \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} \leq 0.6 \cdot \varepsilon_{fk}$$

Confinamento

Crisi nei pilastri per perdita di aderenza delle barre (par. 4.7.2.1.2 CNR-DT 200 R1/2013):

Il pericolo di scorrimento delle giunzioni per aderenza nei pilastri può essere eliminato mediante **confinamento con FRP**.

Per sezioni circolari di diametro D, lo spessore da attribuire al confinamento può essere valutato mediante la seguente relazione:

$$t_f = \frac{D \cdot (f_l - \sigma_{sw})}{2 \cdot 0.001 \cdot E_f}$$

σ_{sw} = tensione di trazione nelle staffe corrispondente alla deformazione dell'1% o la pressione di iniezione della malta tra FRP e pilastro, se presente;

f_l = pressione di confinamento nella zona di sovrapposizione di lunghezza L_s , assunta pari a:

$$f_l = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\left[\frac{u_e}{2 \cdot n} + 2 \cdot (d_b + c) \right] \cdot L_s}$$

f_{yd} = tensione di progetto delle barre di acciaio

u_e = perimetro della sezione all'interno del poligono che circoscrive le barre longitudinali di diametro medio d_b

n = numero di barre giuntate lungo u_e

c = spessore del copriferro

Crisi nei pilastri per svergolamento delle barre (par. 4.7.2.1.2 CNR-DT 200 R1/2013):

Il pericolo di svergolamento delle barre longitudinali di armatura può essere eliminato mediante confinamento con FRP.

Lo spessore, t_f , da attribuire a tale confinamento può essere valutato mediante la seguente relazione:

$$t_f = \frac{0.45 \cdot n \cdot f_{yd}^2 \cdot d}{4 \cdot E_{ds} \cdot E_f} \approx \frac{10 \cdot n \cdot d}{E_f}$$

n = numero totale di barre longitudinali in condizioni di potenziale svergolamento

f_{yd} = tensione di progetto delle barre di acciaio

d = dimensione della sezione parallela al piano di flessione

E_f = modulo di elasticità normale del confinamento di FRP nella direzione delle barre longitudinali

E_{ds} = “modulo ridotto” delle barre di armatura longitudinali

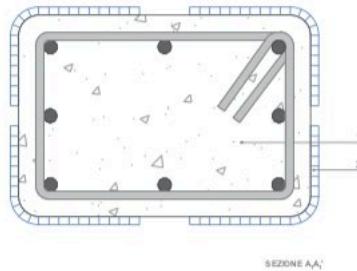
$$E_{ds} = \frac{4 \cdot E_s \cdot E_i}{(\sqrt{E_s} + \sqrt{E_i})^2}$$

E_s = modulo di elasticità normale delle barre

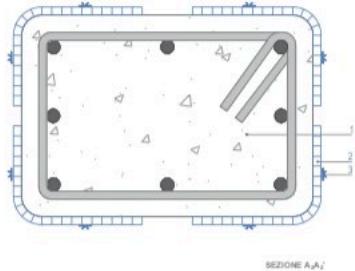
E_i = modulo di elasticità tangente iniziale in campo plastico

Fasi operative

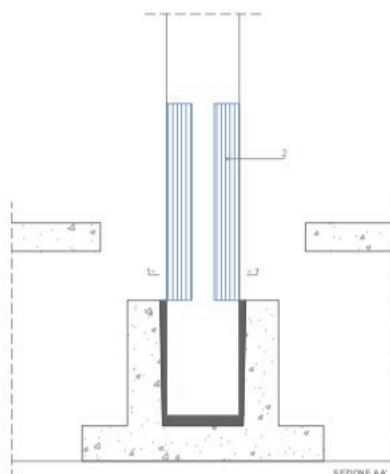
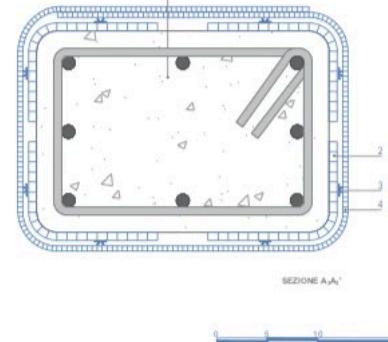
FASE 1



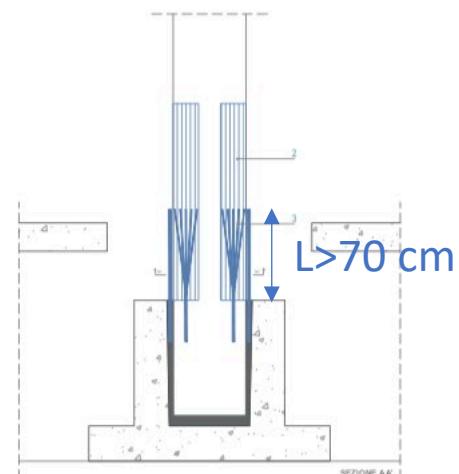
FASE 2



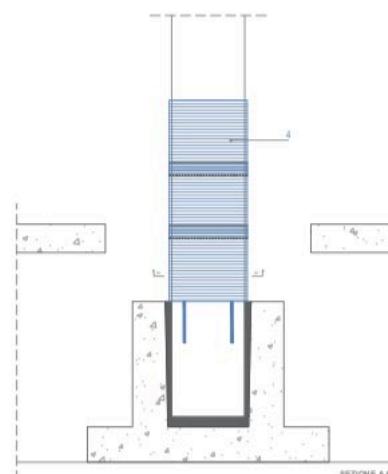
FASE 3



1) Applicazione fasce FRP longitudinali agli angoli del pilastro (**Rinforzo a presso-flessione**)



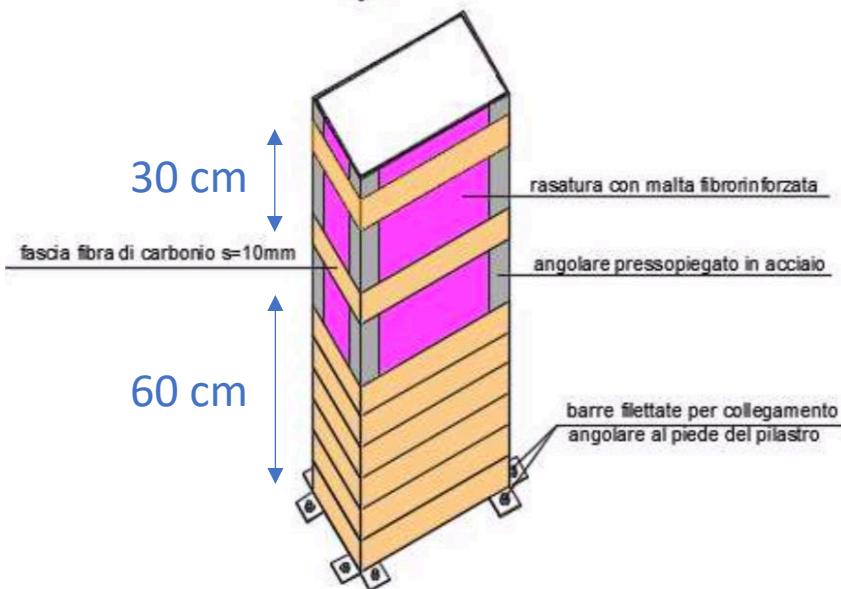
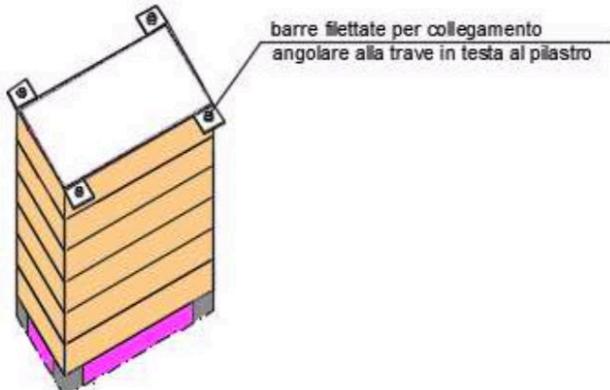
2) Applicazione connettori a fiocco **per ancoraggio FRP**



3) Applicazione **fasce FRP di confinamento** trasversali (**Rinforzo a taglio e confinamento**)

Rinforzo dei pilastri

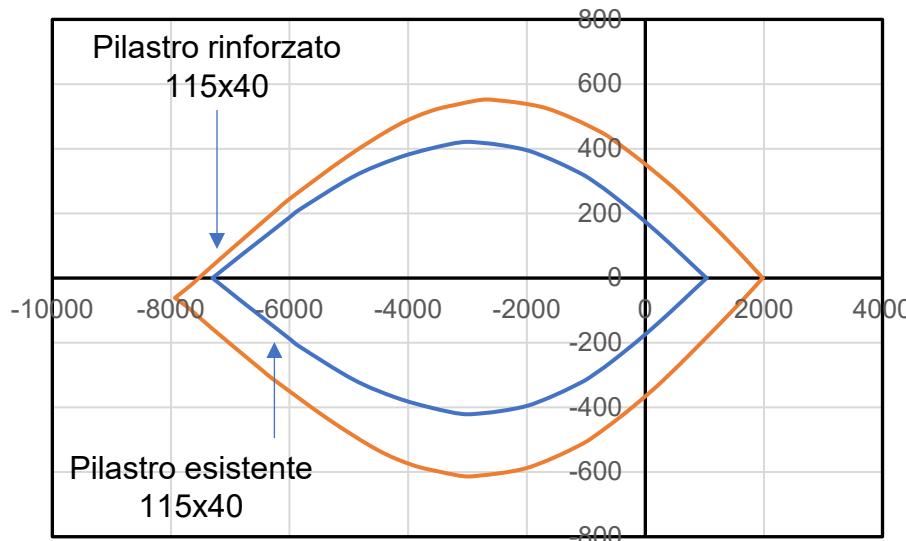
INTERVENTO DI RINFORZO CON CFRP SU PILASTRI ESISTENTI:



PILASTRI ESISTENTI

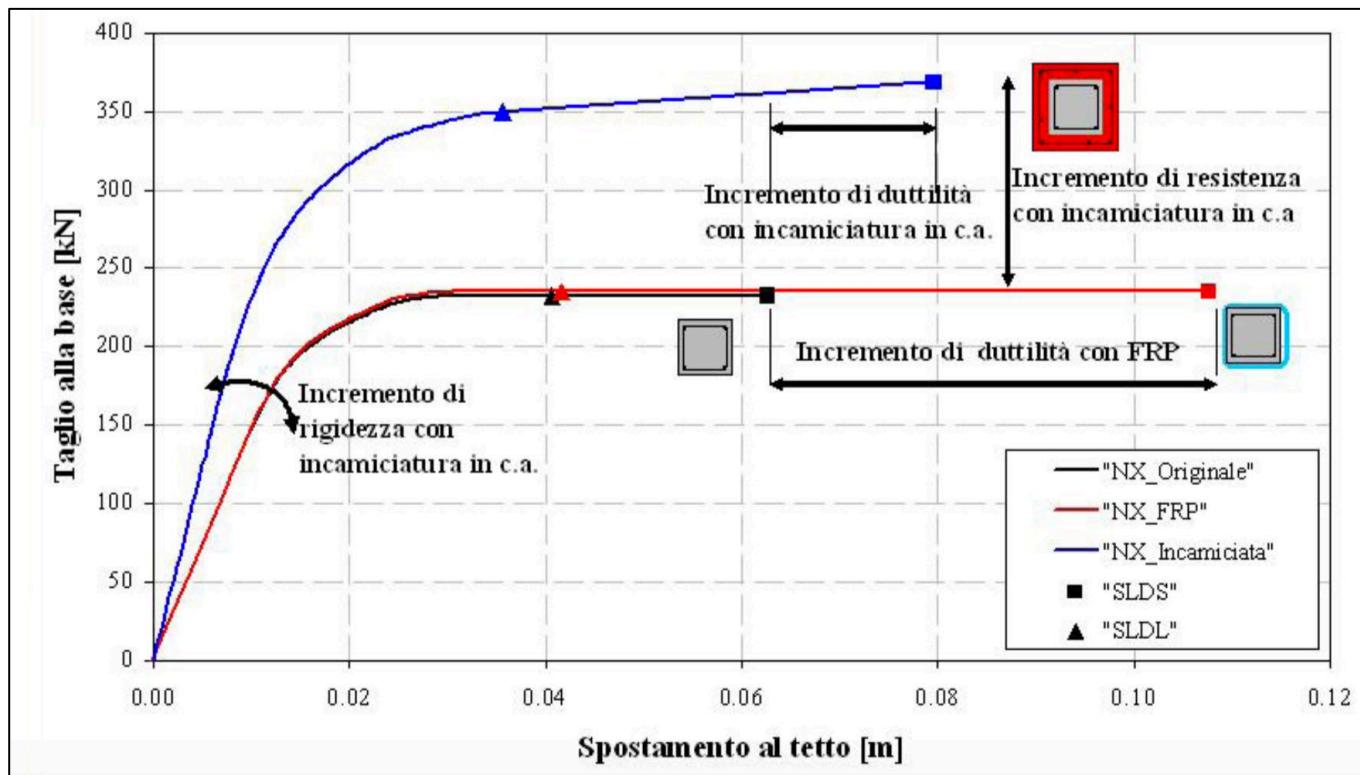
SEZIONE	ARMATURA
75X40	10F18 staffe F6/30
115X40	16F18 staffe F6/20

DIAGRAMMI DI INTERAZIONE M-N

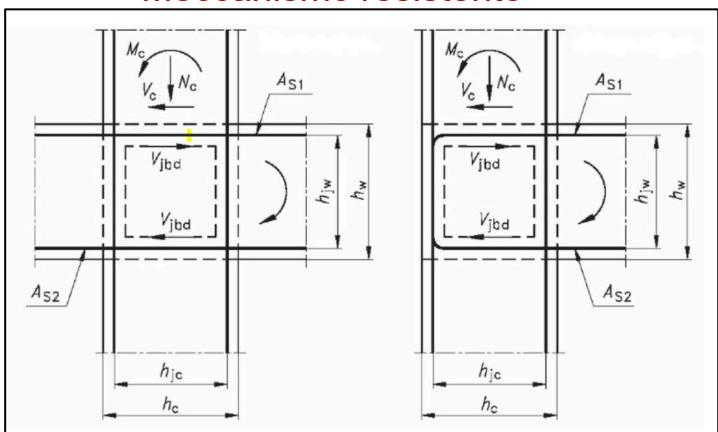


Rinforzo dei pilastri

Confronto strategie di rinforzo (elementi presso-inflessi)



Meccanismo resistente



Resistenza a trazione diagonale (par. C8.7.2.3.5 Circolare NTC2018):

$$\sigma_{jt} = \left| \frac{N}{2A_j} - \sqrt{\left(\frac{N}{2A_j} \right)^2 + \left(\frac{V_j}{A_j} \right)^2} \right| \leq 0.3\sqrt{f_c} (f_c \text{ in MPa}) \quad [\text{C8.7.2.11}]$$

N = azione assiale presente nel pilastro superiore;
 V_j = taglio totale agente sul nodo, ottenuto come somma algebrica del taglio trasmesso dal pilastro superiore e degli sforzi orizzontali trasmessi dalle parti superiori delle travi;
 $A_j = b_j \cdot h_{jc}$ (b_j e h_{jc} sono definiti al § 7.4.4.3.1 delle NTC2018).

Le resistenze dei materiali sono ottenute come media delle prove eseguite in situ, divise per il fattore di confidenza appropriato e per il coefficiente parziale del materiale.

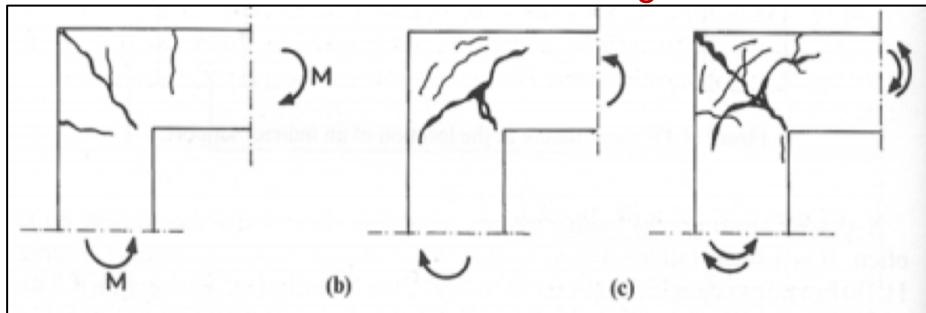


SE LA VERIFICA NON È SODDISFATTA:

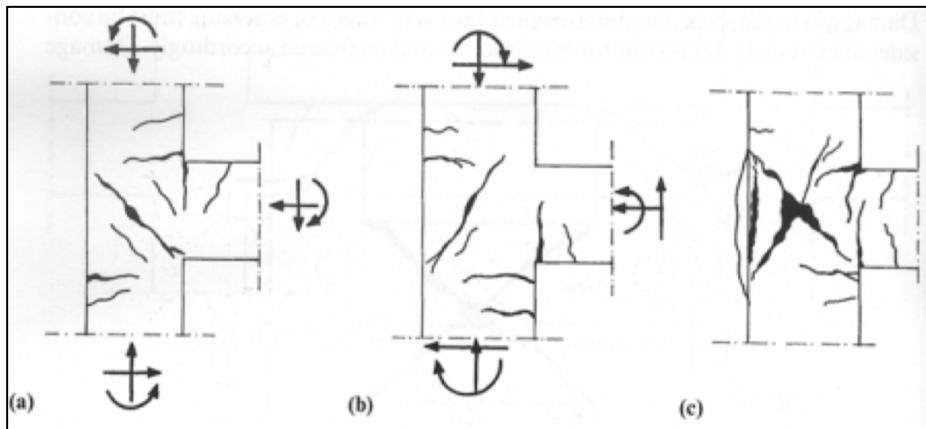
Crisi a taglio trazione del nodo = è necessario rinforzare il nodo con FRP per sostenere l'intera domanda di taglio o parte di essa.

Rinforzo dei nodi

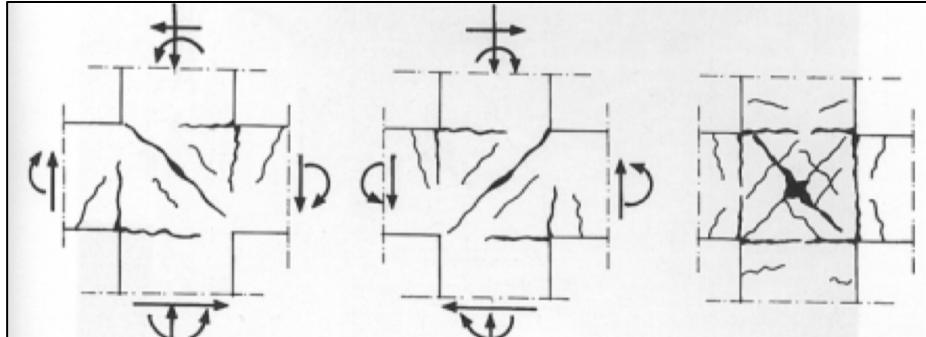
Collazzo di un nodo d'angolo



Collazzo di un nodo esterno



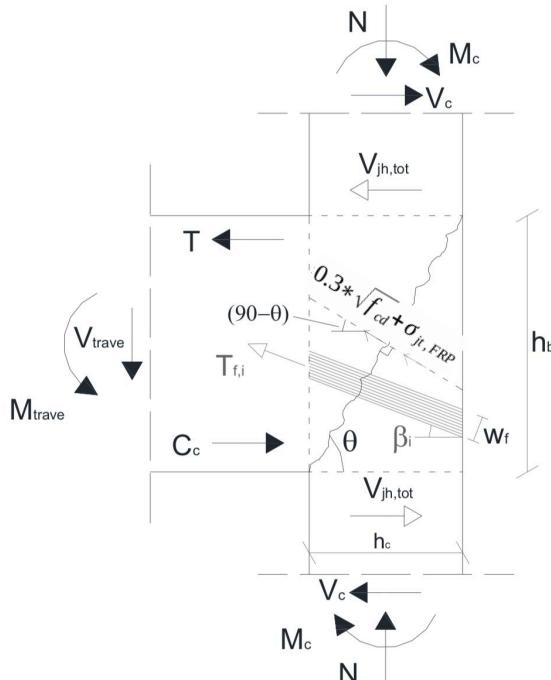
Collazzo di un nodo interno



Rinforzo dei nodi

Il calcolo dell'incremento di resistenza a trazione conseguibile nei pannelli dei nodi non confinati va eseguito tenendo conto del contributo dell'FRP nella **direzione delle tensioni principali di trazione** e limitando la massima deformazione di quest'ultimo al valore del 4%.

Il progetto del rinforzo mediante FRP consiste nel **determinare il numero di strati di materiale composito da applicare al nodo per incrementarne la resistenza** in termini di tensione principale di trazione in accordo con il C8.7.4. 3 della Circolare n. 7 del 2019. L'approccio progettuale è l'Approccio 2 del *fib Bulletin 90* (2019).



$$\sigma_{jt,tot} = 0.3 * \sqrt{f_{cd}} + \sigma_{jt,FRP}$$

Resistenza
a trazione
del solo
calcestruzzo

$$\sigma_{jt,FRP} = \frac{\varepsilon_{f,d} * E_f * A_f}{\left(\frac{b_c * h_c}{\sin \theta} \right)}$$

Tensione principale di trazione
che il rinforzo in FRP può
sostenere

ε_{fd} = deformazione di progetto del composito (vedi
rinforzo a flessione)

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd} \right\}$$

Nel caso di rinforzo applicato su un pannello di nodo danneggiato e riparato, si consiglia di assumere come deformazione di progetto $0.8\varepsilon_{fd}$.

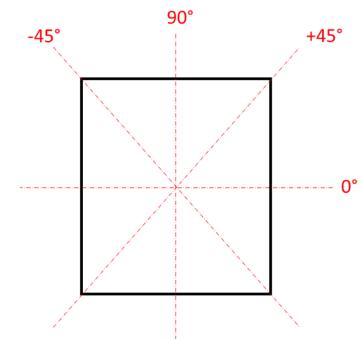
A_f = area equivalente del rinforzo in FRP, da valutarsi come di seguito riportato.

Rinforzo dei nodi

$$\sigma_{jt, FRP} = \frac{\varepsilon_{f,d} * E_f * A_f}{\left(\frac{b_c * h_c}{\sin \theta} \right)}$$

È possibile scegliere tra differenti tipologie di tessuto in FRP, che si differenziano in base alla disposizione delle fibre rispetto all'asse orizzontale:

- Quadriassiale (fibre orientate a 0° , $\pm 45^\circ$, 90°);
- Biassiale (fibre orientate a 0° , 90°);
- Uniassiale 0° (fibre disposte parallelamente all'asse orizzontale del nodo);
- Uniassiale 90° (fibre disposte ortogonalmente all'asse orizzontale del nodo).



Si riportano le formule per il **calcolo dell'area di tessuto di rinforzo** secondo quanto riportato nel *fib bulletin 90 (2019)*.

AREA DEL RINFORZO (TESSUTO QUADRIASSIALE)

$$A_f = n_s * n_l * t_f * h_c * \cos \theta * (1 + \tan \theta + 2 * (\tan \theta)^2)$$

AREA DEL RINFORZO (TESSUTO BIASIALE)

$$A_f = n_s * n_l * t_f * h_c * \cos \theta * (1 + (\tan \theta)^2)$$

AREA DEL RINFORZO (TESSUTO UNIASSIALE 0°)

$$A_f = n_s * n_l * t_f * h_c * \sin \theta$$

AREA DEL RINFORZO (TESSUTO UNIASSIALE 90°)

$$A_f = n_s * n_l * t_f * h_c * \cos \theta$$

Rinforzo dei nodi

AREA DEL RINFORZO (TESSUTO QUADRIASSIALE)

$$A_f = n_s * n_l * t_f * h_c * \cos \theta * (1 + \tan \theta + 2 * (\tan \theta)^2)$$

AREA DEL RINFORZO (TESSUTO BIASSIALE)

$$A_f = n_s * n_l * t_f * h_c * \cos \theta * (1 + (\tan \theta)^2)$$

AREA DEL RINFORZO (TESSUTO UNIASSIALE 0°)

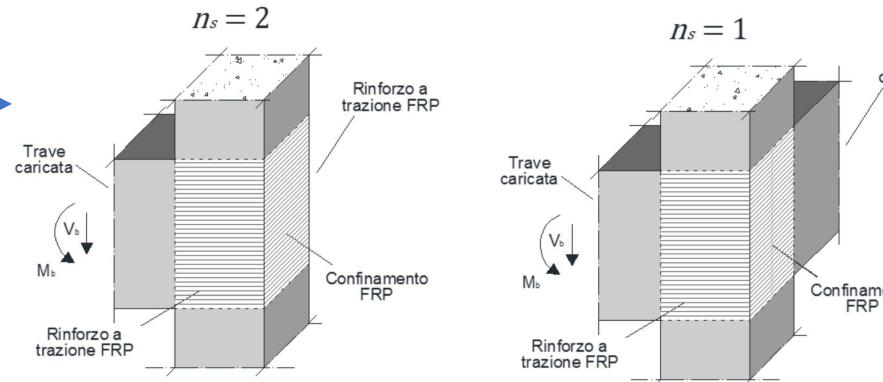
$$A_f = n_s * n_l * t_f * h_c * \sin \theta$$

AREA DEL RINFORZO (TESSUTO UNIASSIALE 90°)

$$A_f = n_s * n_l * t_f * h_c * \cos \theta$$

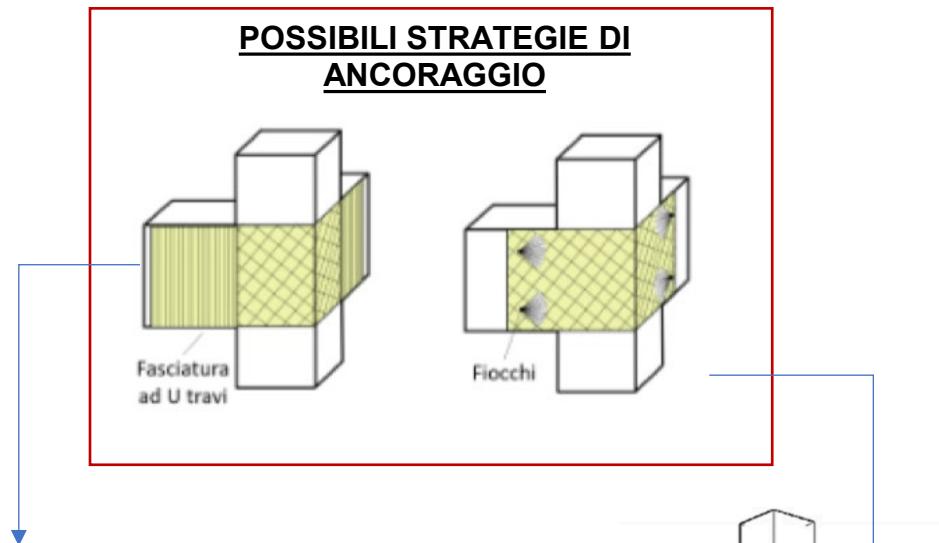
dove:

- n_s = numero di lati del pannello di nodo rinforzati a taglio;
- n_l = numero di strati di rinforzo;
- t_f = spessore equivalente del tessuto secco in FRP;
- h_c = altezza della sezione del pilastro;
- $\theta = \arctan(h_b/h_c)$;



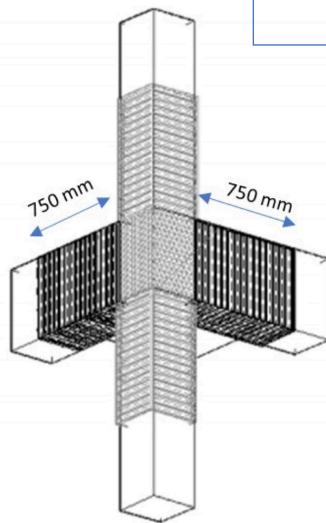
Rinforzo dei nodi

L'intervento risulterà efficace solo se le estremità del rinforzo sono **perfettamente ancorate**, attraverso l'adozione di opportuni particolari costruttivi. In caso contrario il rinforzo non può essere considerato come efficace.



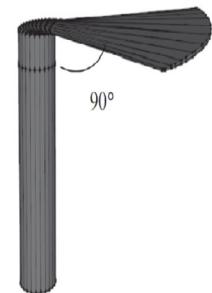
L'ancoraggio del rinforzo di nodo in FRP viene effettuato applicando sulle travi che vi convergono, una fasciatura ad U in fibra uniassiale **per una lunghezza di 750 mm** a partire dal bordo della trave.

Questa tipologia di ancoraggio, per la sua conformazione richiede, però, la demolizione parziale della tamponatura al di sotto della trave, comportando, pertanto, un minimo grado di disturbo agli occupanti.



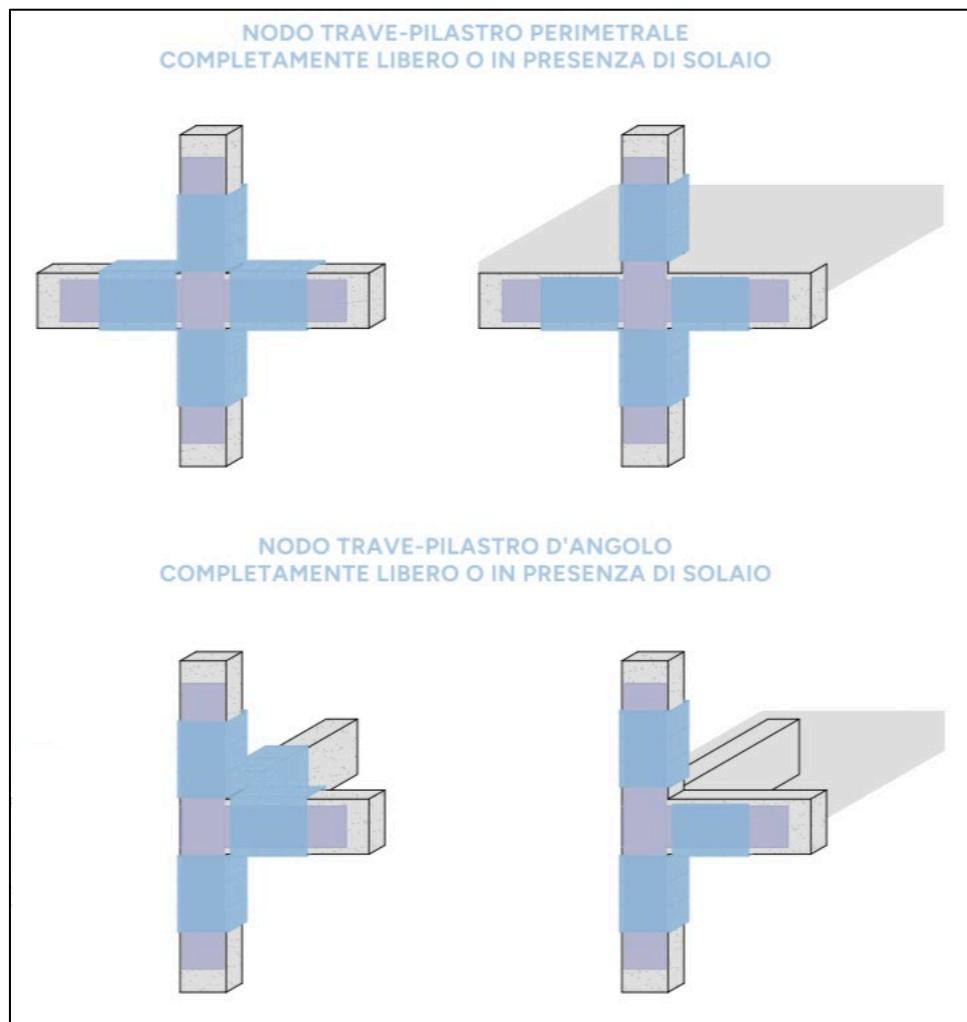
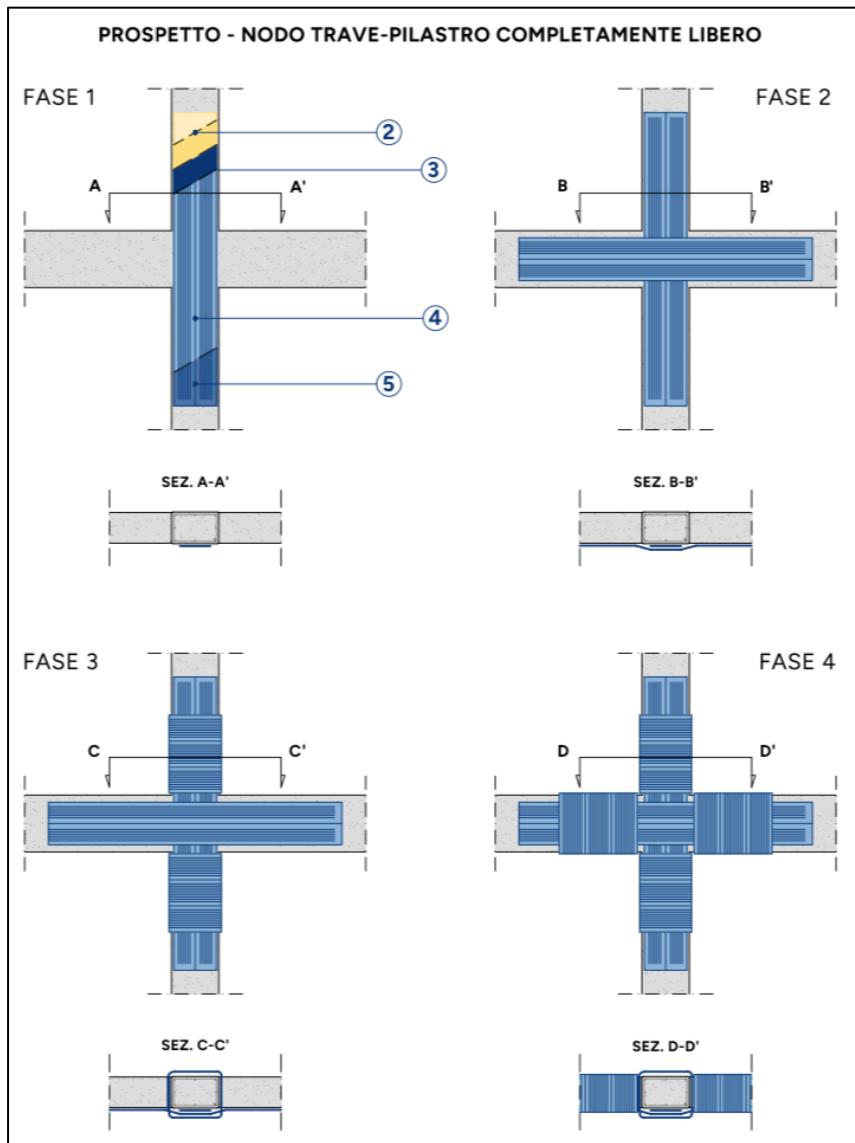
FIOCCHI:

Si tratta di elementi fibrorinforzati alloggiati in appositi fori all'interno delle travi che garantiscono l'ancoraggio del rinforzo sul nodo operando dal solo esterno e senza dover demolire alcuna porzione di tamponatura.



Rinforzo dei nodi

Fasi operative

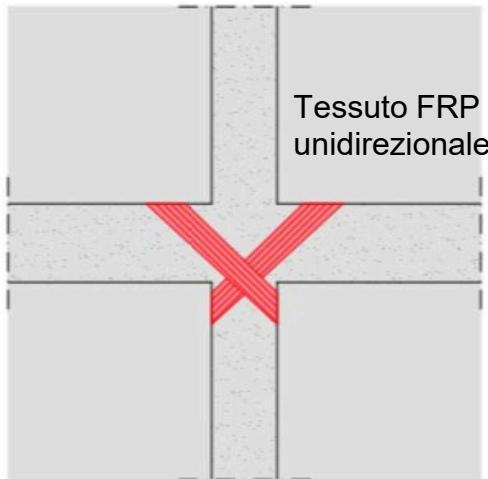


Rinforzo dei nodi

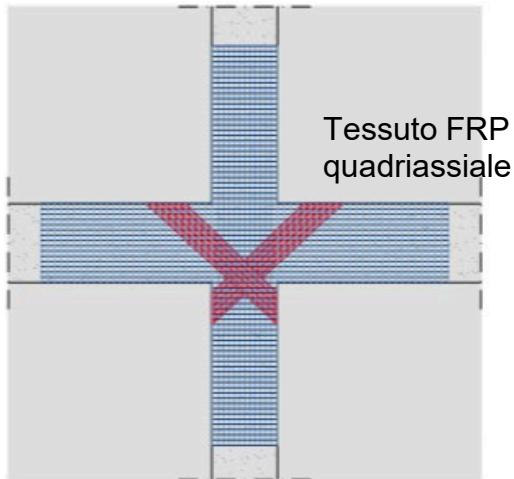
Fasi operative

PROSPETTO - NODO TRAVE-PILASTRO IN PRESENZA DI TRAMEZZI

FASE 1



FASE 2



FASE 3

