

Corso di Riabilitazione Strutturale

POTENZA, a.a. 2012 – 2013

Prof. Felice C. Ponzo *Scuola di Ingegneria, Università di Basilicata*

Interventi con FRP-rafforzamento locale di nodi d'angolo

Ing. Gianluca AULETTA

S.I, Università di Basilicata

gianluca.auletta@tiscali.it

Normative di riferimento

- Norme tecniche per le costruzioni NTC 2008 e circolare 2009;
- Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati; CNR_DT200_2004;
- 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; LL.PP 24/07/2009;
- Linee guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni;

Interventi con FRP

Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati; CNR_DT200_2004

RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A.

Caratteristiche dei compositi e dei loro componenti.

I materiali compositi presentano le seguenti caratteristiche:

- sono costituiti da due o più materiali (fasi) di natura diversa e “macroscopicamente” distinguibili;
- almeno due delle fasi presentano proprietà fisiche e meccaniche “sufficientemente” diverse tra loro, in modo da impartire al composito proprietà differenti da quelle dei costituenti.

I compositi fibrorinforzati a matrice polimerica soddisfano entrambe le suddette caratteristiche: essi sono infatti costituiti da una matrice polimerica di natura organica e da fibre di rinforzo

Un composito è un continuo non omogeneo e, nella maggior parte dei casi, anisotropo.

Interventi con FRP

Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati; CNR_DT200_2004

Tabella 2-1 – Confronto tra le proprietà delle fibre di rinforzo e delle matrici più comuni e dell'acciaio da costruzione (valori indicativi).

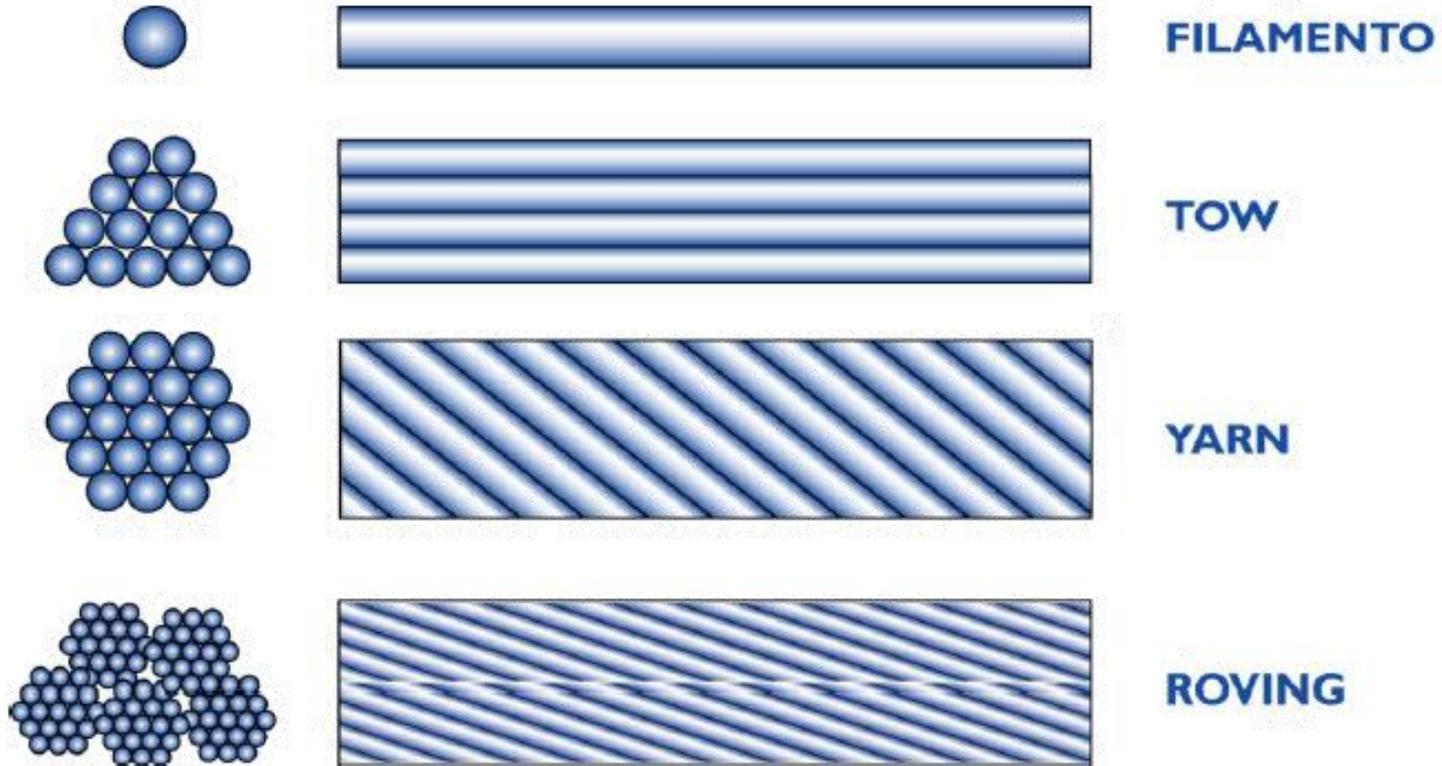
	Modulo di elasticità normale E	Resistenza a trazione σ_T	Deformazione a rottura ε_T	Coefficiente di dilatazione termica α	Densità ρ
	[GPa]	[MPa]	[%]	[$10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]	[g/cm ³]
Fibre di vetro E	70 – 80	2000 – 3500	3.5 – 4.5	5 – 5.4	2.5 – 2.6
Fibre di vetro S	85 – 90	3500 – 4800	4.5 – 5.5	1.6 – 2.9	2.46 – 2.49
Fibre di carbonio (alto modulo)	390 – 760	2400 – 3400	0.5 – 0.8	-1.45	1.85 – 1.9
Fibre di carbonio (alta resistenza)	240 – 280	4100 – 5100	1.6 – 1.73	-0.6 – -0.9	1.75
Fibre aramidiche	62 – 180	3600 – 3800	1.9 – 5.5	-2	1.44 – 1.47
Matrice polimerica	2.7 – 3.6	40 – 82	1.4 – 5.2	30 – 54	1.10 – 1.25
Acciaio da costruzione	206	250 – 400 (snervamento) 350 – 600 (rottura)	20 – 30	10.4	7.8

Interventi con FRP

Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati; CNR_DT200_2004

RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A.

Principali fibre per compositi.

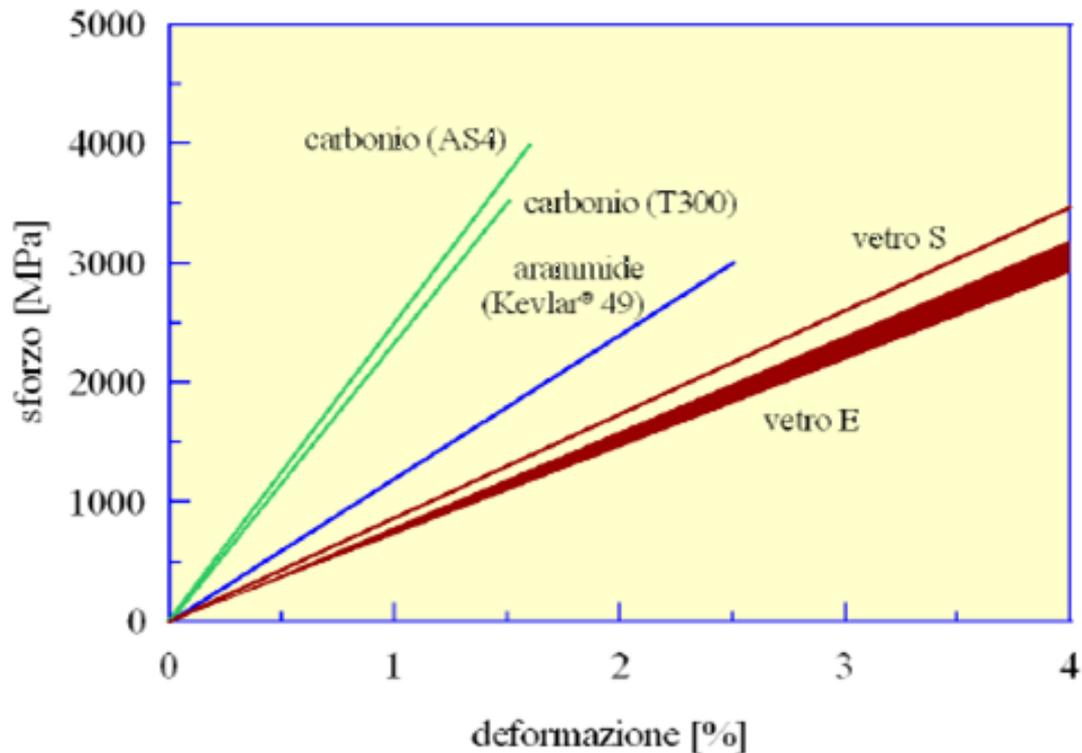


Interventi con FRP

Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati; CNR_DT200_2004

RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A.

Principali fibre per compositi.



Fibre di vetro GFRP.

Fibre di carbonio CFRP.

Fibre aramidiche AFRP.

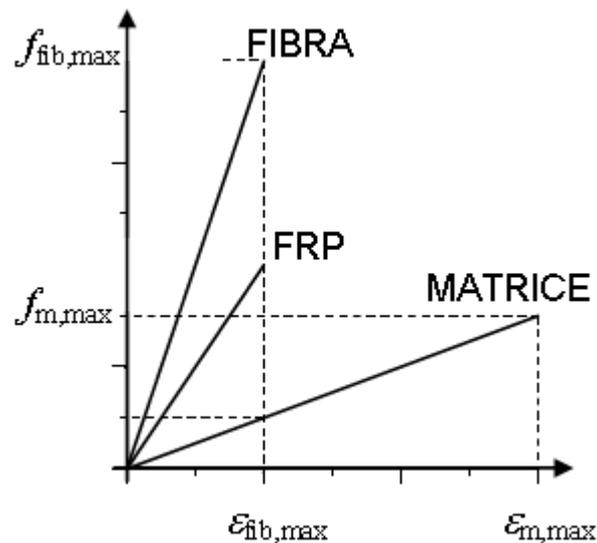
Interventi con FRP

Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati; CNR_DT200_2004

RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A.

Proprietà meccaniche dei sistemi di rinforzo.

Nei compositi fibrorinforzati le fibre svolgono il ruolo di elementi portanti sia in termini di resistenza che di rigidità, 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 rigidità, mentre la loro deformazione a rottura è inferiore a quella della matrice.



Interventi con FRP

Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati; CNR_DT200_2004

RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A.

Proprietà dei materiali e dei prodotti.

I valori delle proprietà dei materiali o dei prodotti usati nel rinforzo devono essere stati determinati mediante prove normalizzate di laboratorio.

Per la generica proprietà di resistenza o di deformazione di un materiale o di un prodotto usato nel rinforzo, il valore di calcolo, X_d , può essere espresso in forma generale:

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

γ_m è il coefficiente parziale del materiale o del prodotto, che tiene conto del tipo di applicazione;

Il fattore di conversione η si ottiene come prodotto del fattore di conversione ambientale η_a , per il fattore di conversione relativo ad effetti di lunga durata, η_1 .

Interventi con FRP

Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati; CNR_DT200_2004

RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A.

Capacità di calcolo.

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R\{X_{d,i}; a_{d,i}\}$$

γ_{Rd} è un coefficiente parziale che tiene conto delle incertezze insite del modello meccanico considerato (ad esempio quello per la flessione, il taglio, l'ancoraggio, ecc.)

Tabella 2-2 – Coefficienti parziali γ_{Rd} .

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

Interventi con FRP

Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati; CNR_DT200_2004

RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A.

Coefficienti parziali γ_m per i materiali ed i prodotti.

Tabella 2-1 – Coefficienti parziali γ_m per i materiali ed i prodotti.

Modalità di collasso	Coefficiente parziale	Applicazione tipo A	Applicazione tipo B
Rottura	γ_f	1.10	1.25
Distacco	$\gamma_{f,d}$	1.20	1.50

Si definiscono applicazioni di tipo A sistemi completi di rinforzo di cui sono certificati sia i materiali che il sistema completo applicato ad un substrato definito, mentre si definiscono applicazioni di tipo B sistemi in cui sono certificati solo i materiali.

Interventi con FRP

Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati; CNR_DT200_2004

RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A.

Azioni ambientali e fattori di conversione ambientale η_a .

Le proprietà meccaniche (per esempio la resistenza a trazione, la deformazione ultima ed il modulo di elasticità normale) di alcuni sistemi di FRP degradano in presenza di determinate condizioni ambientali quali: ambiente alcalino, umidità (acqua e soluzioni saline), temperature estreme, cicli termici, cicli di gelo e disgelo, radiazioni ultraviolette (UV).

Tabella 2-3 – Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e vari sistemi di 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

Interventi con FRP

Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati; CNR_DT200_2004

RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A.

Modalità di carico e fattore di conversione per effetti di lunga durata η_a .

Le proprietà meccaniche di alcuni sistemi a base di FRP degradano per l'effetto della viscosità, del rilassamento e della fatica.

Per evitare la rottura del rinforzo di FRP sotto tensioni prolungate nel tempo, ovvero in condizioni di carico ciclico, è possibile introdurre opportuni fattori di conversione, η_1 , nelle verifiche agli stati limite di esercizio.

Tabella 2-4 – Fattore di conversione per effetti di lunga durata η_1 per vari sistemi di FRP (carichi di esercizio).

Modalità di carico	Tipo di fibra / resina	η_1
Persistente (viscosità e rilassamento)	Vetro / Epossidica	0.30
	Arammidica / Epossidica	0.50
	Carbonio / Epossidica	0.80
Ciclico (fatica)	Tutte	0.50

Interventi con FRP

Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati; CNR_DT200_2004

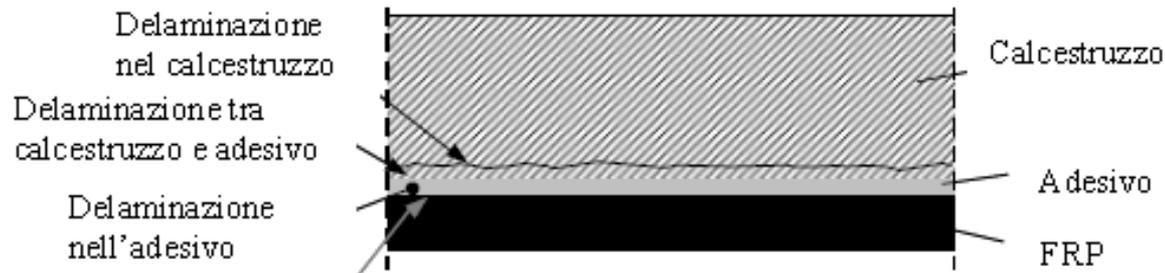
RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A.

Meccanismi di rottura per delaminazione.

Nel rinforzo di elementi di c.a. mediante lamine o tessuti di materiale composito, il ruolo dell'aderenza tra calcestruzzo e composito assume grande importanza in quanto il meccanismo di rottura per delaminazione (perdita di aderenza) è di tipo fragile.

la delaminazione può prodursi all'interno dell'adesivo, tra calcestruzzo ed adesivo, nel calcestruzzo o all'interno del rinforzo

Nel caso di rinforzi posti correttamente in opera, poiché la resistenza dell'adesivo è in genere molto più elevata di quella a trazione del calcestruzzo, la delaminazione avviene sempre all'interno di quest'ultimo con l'asportazione di uno strato di materiale, il cui spessore può variare da pochi millimetri fino ad interessare l'intero copriferro delle barre di armatura.



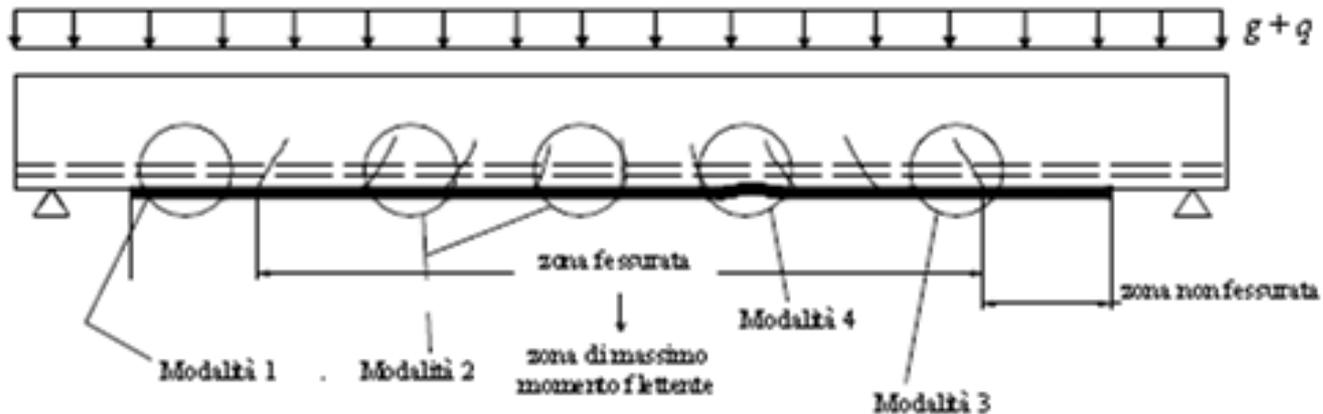
Delaminazione nel rinforzo

Interventi con FRP

Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati; CNR_DT200_2004

RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A.

Meccanismi di rottura per delaminazione.



Modalità 1 (Delaminazione di estremità);

Modalità 2 (Delaminazione intermedia, causata da fessure per flessione nella trave);

Modalità 3 (Delaminazione causata da fessure diagonali da taglio);

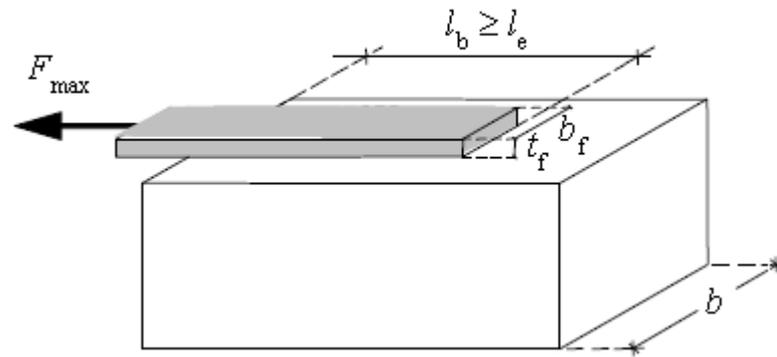
Modalità 4 (Delaminazione causata da irregolarità e rugosità della superficie di calcestruzzo).

Interventi con FRP

Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati; CNR_DT200_2004

RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A.

Meccanismi di rottura per delaminazione.



$$l_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ctm}}}$$

Il valore ultimo della forza supportabile dal rinforzo di FRP, prima che subentri la delaminazione, 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.

Interventi con FRP

Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati; CNR_DT200_2004

RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A.

Rinforzo a flessione.

Si ipotizza che la rottura per flessione si manifesti quando si verifica 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:

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

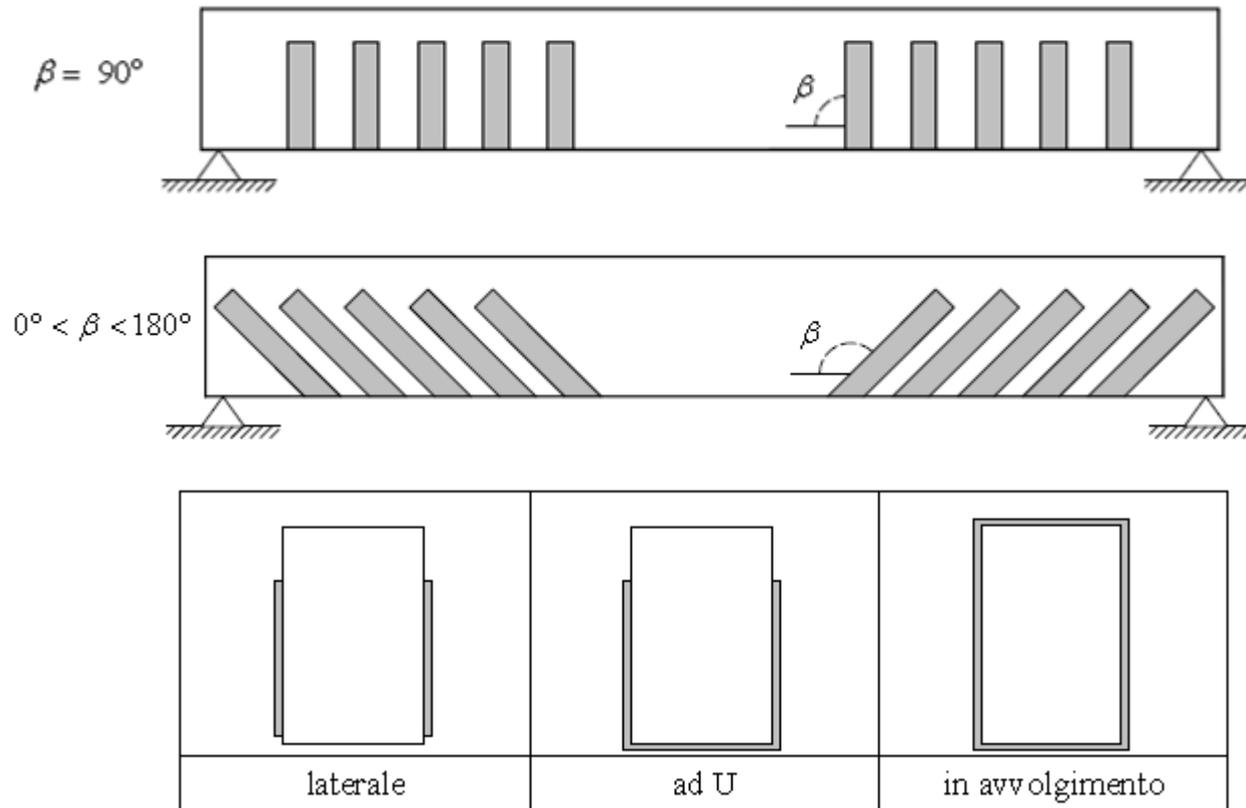
dove ε_{fk} è la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo, γ_f e η_a sono i coefficienti di sicurezza, ε_{fdd} è la deformazione massima per delaminazione intermedia come definita al § 4.1.4

Interventi con FRP

Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati; CNR_DT200_2004

RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A.

Rinforzo a Taglio. Configurazioni per il rinforzo a taglio



Interventi con FRP

Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati; CNR_DT200_2004

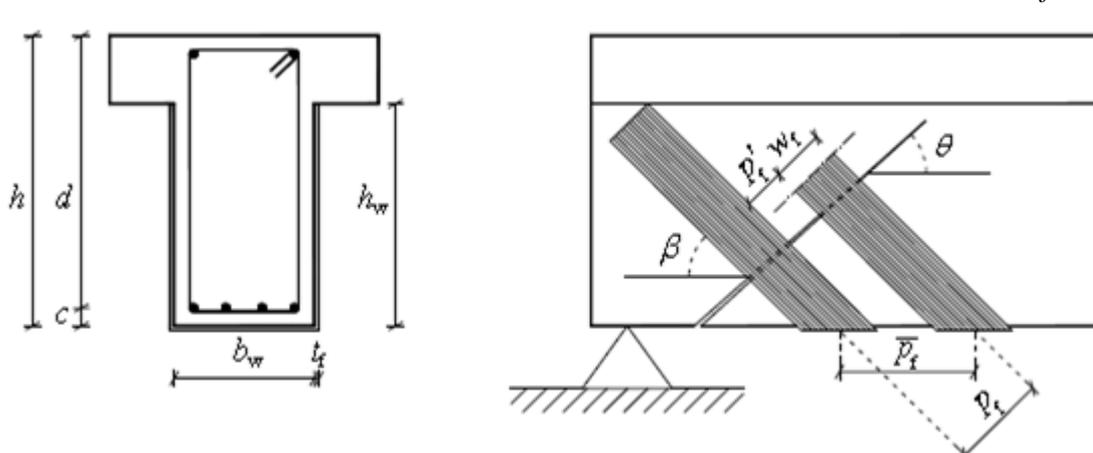
RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A.

Rinforzo a Taglio. Resistenza di progetto a taglio

$$V_{Rd} = \min \left\{ V_{Rd,ct} + V_{Rd,s} + V_{Rdf}, V_{Rd \max} \right\}$$

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del rinforzo di FRP, V_{Rdf} è dato da:

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



Interventi con FRP

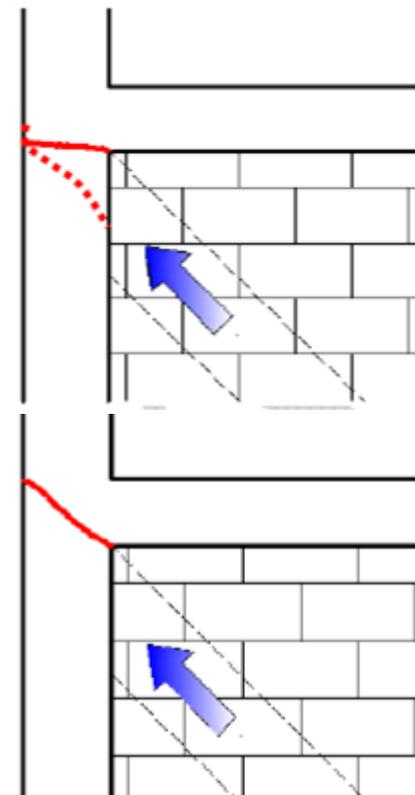


*Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali,
Tamponature e Partizioni*



Criteria per il progetto del rafforzamento locale di nodi non confinati

1) incremento della capacità del pannello di nodo e della porzione di sommità del pilastro rispetto all'azione di taglio esercitata dalla tamponatura.



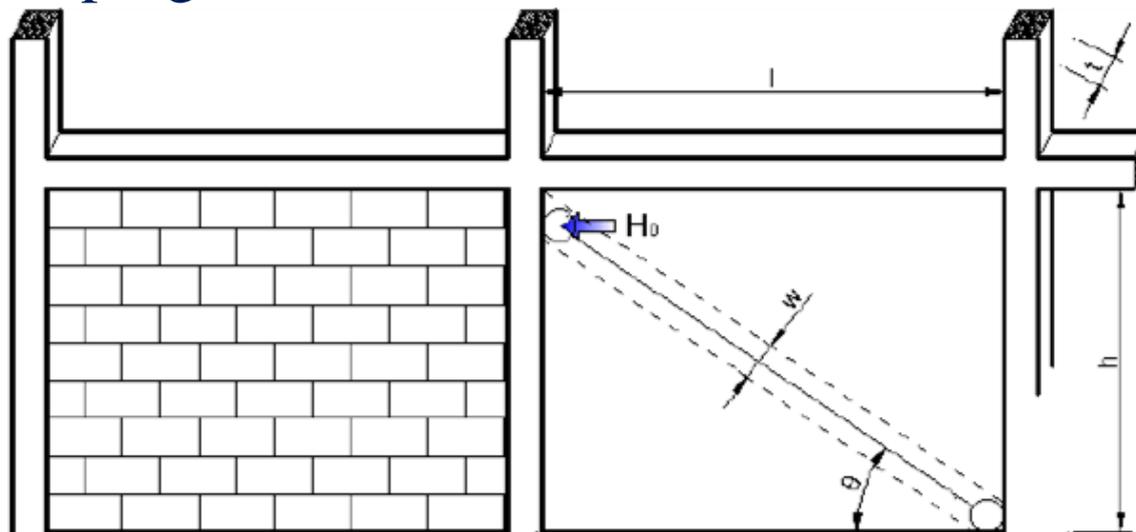
Interventi con FRP



Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali,
Tamponature e Partizioni



Criteria per il progetto del rafforzamento locale di nodi non confinati



L'azione orizzontale, H_0 , che corrisponde alla crisi della tamponatura (rottura diagonale per trazione ovvero rottura per schiacciamento locale degli spigoli) rappresenta la massima azione addizionale che può gravare sul pilastro e può essere calcolata come:

$$H_0 = \min \left(\frac{f_{vk0} \cdot l \cdot t}{0.6 \cdot \phi}; 0.8 \cdot \frac{f_k}{\phi} \cdot \cos^2 \theta \cdot \sqrt[4]{\frac{E_c}{E_m} \cdot I \cdot h \cdot t^3} \right)$$

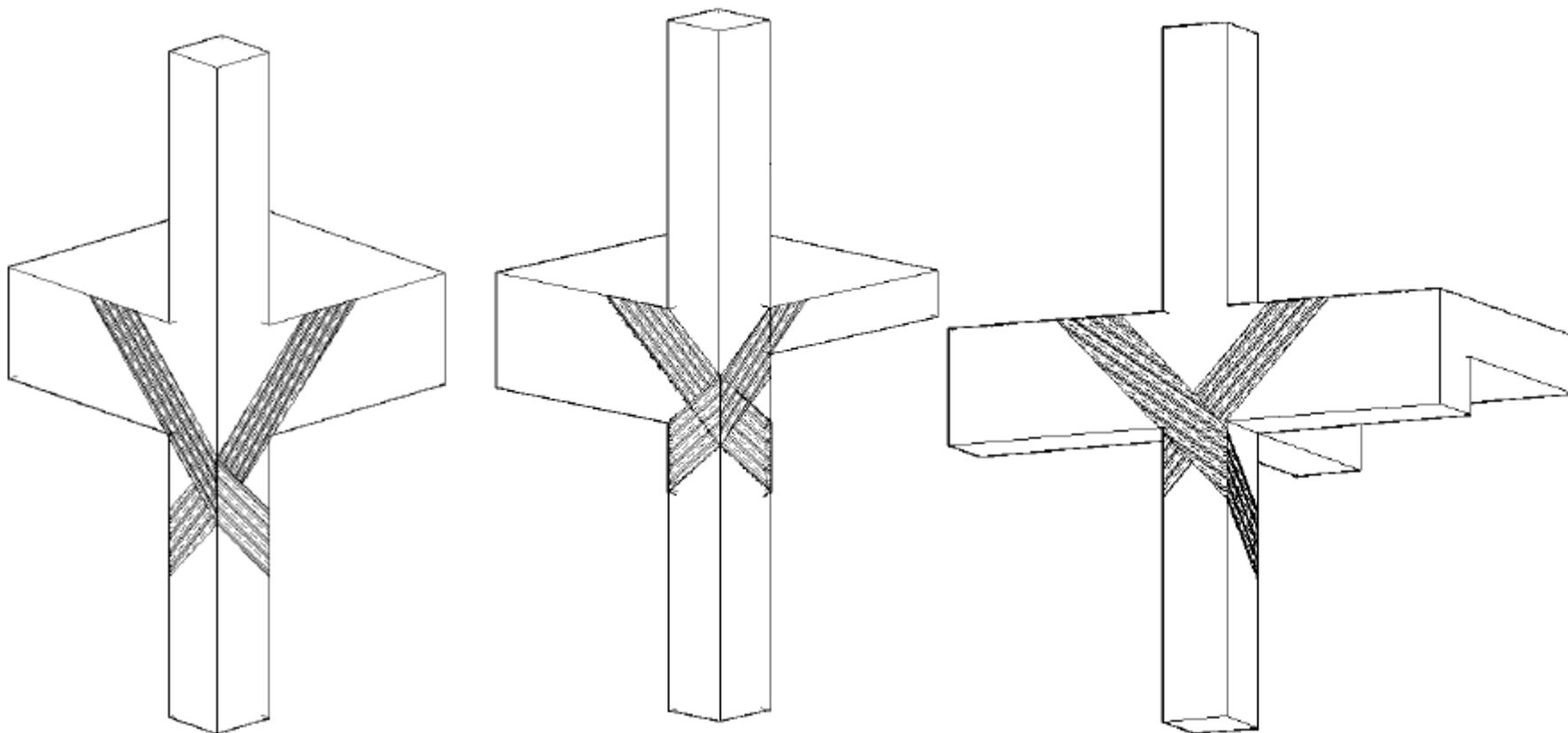
Interventi con FRP



*Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali,
Tamponature e Partizioni*



Criteria per il progetto del rafforzamento locale di nodi non confinati



Interventi con FRP



*Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali,
Tamponature e Partizioni*



Criteri per il progetto del rafforzamento locale di nodi non confinati



Tessuto metallico inclinato



Connettori metallici

Interventi con FRP

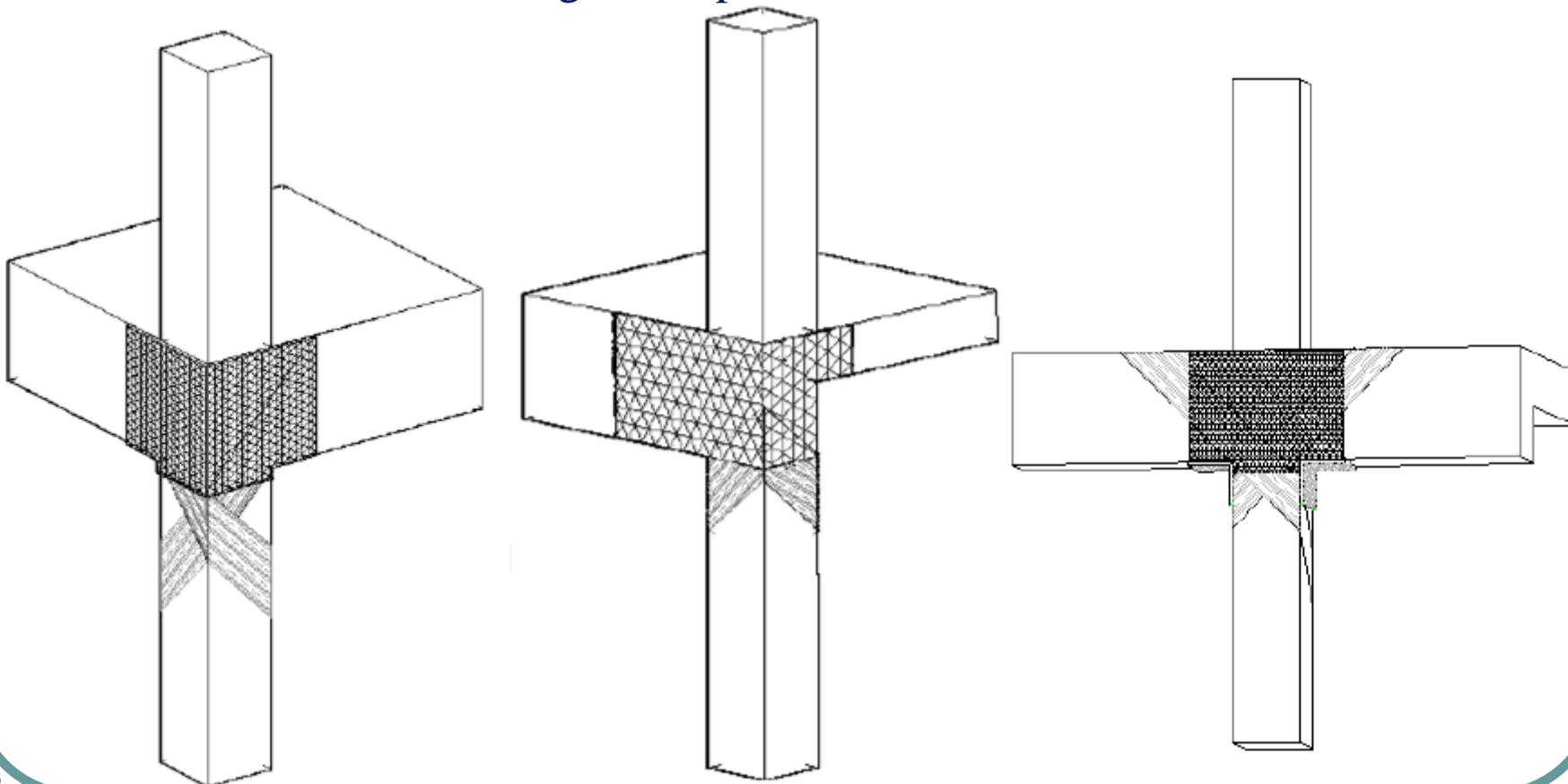


*Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali,
Tamponature e Partizioni*



Criteri per il progetto del rafforzamento locale di nodi non confinati

Incremento di resistenza a taglio del pannello di nodo.



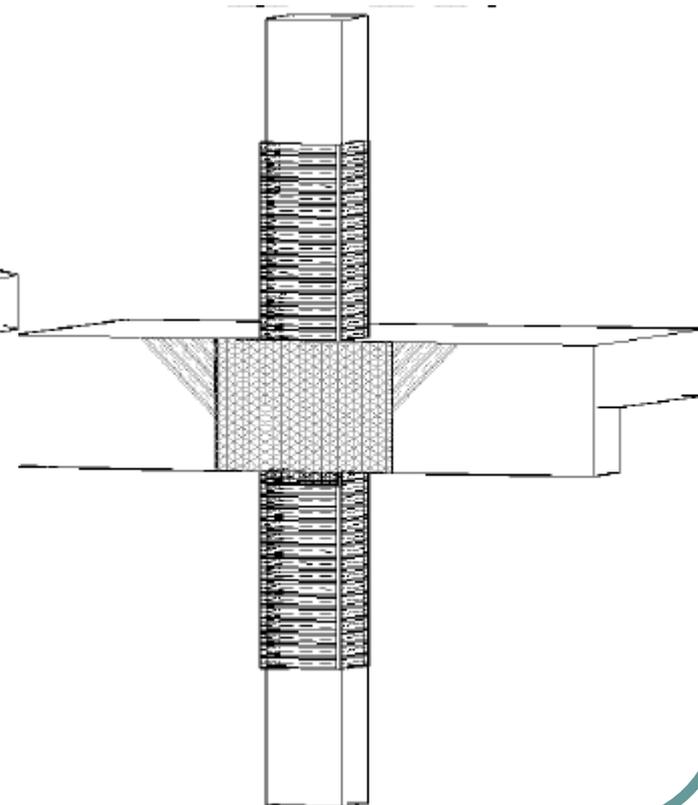
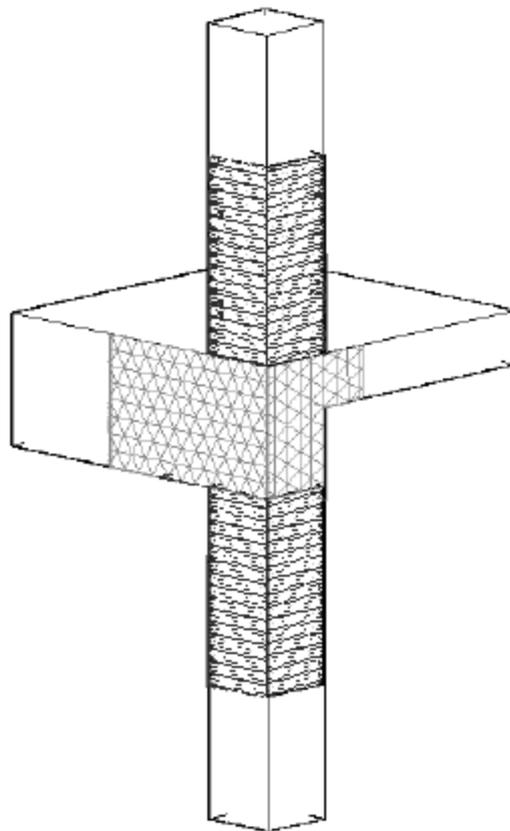
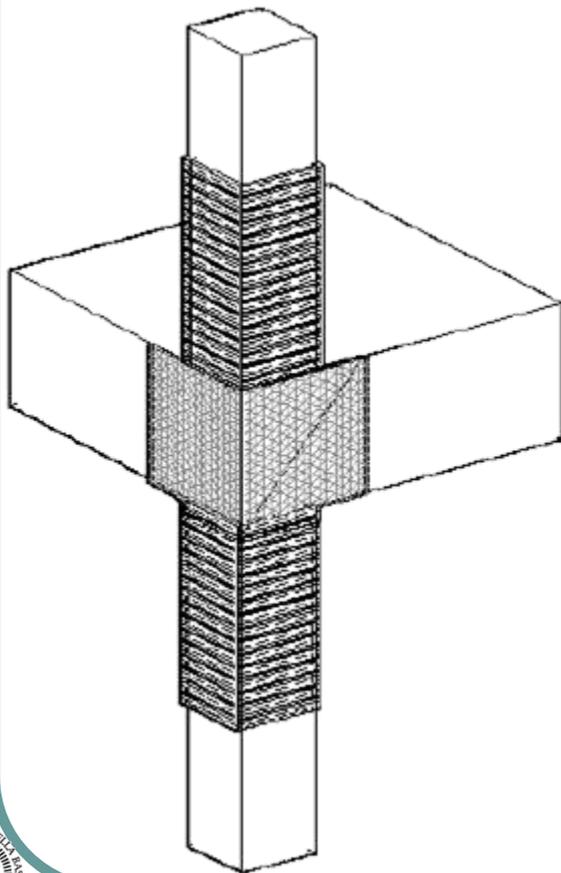
Interventi con FRP



*Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali,
Tamponature e Partizioni*



Criteri per il progetto del rafforzamento locale di nodi non confinati
Confinamento delle estremità dei pilastri.



Interventi con FRP

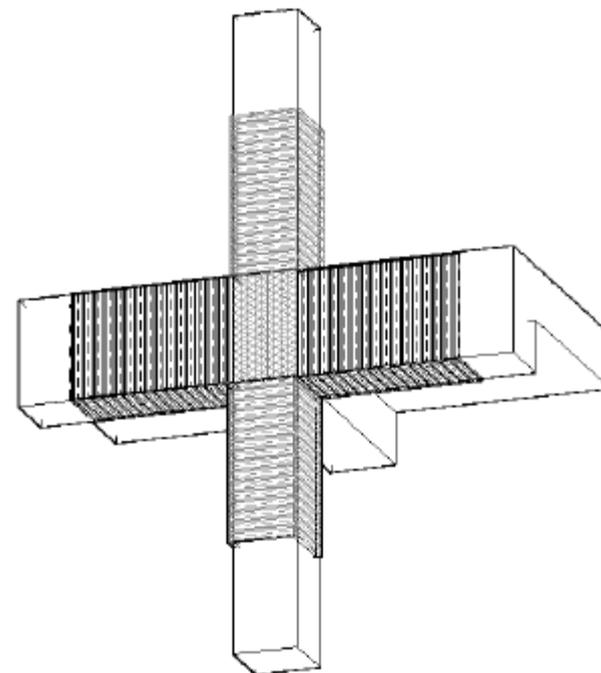
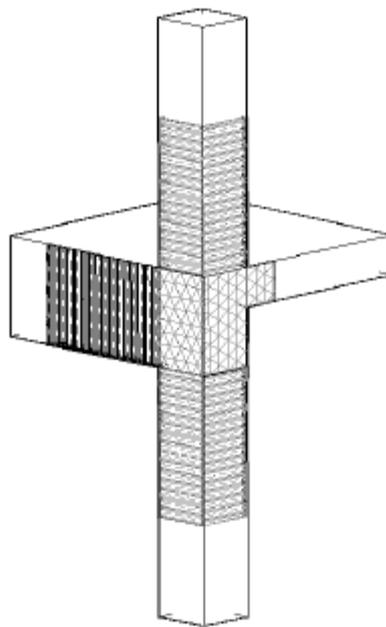
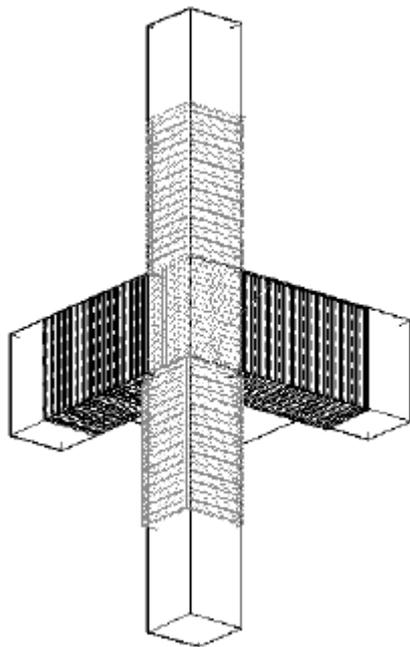


*Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali,
Tamponature e Partizioni*



Criteri per il progetto del rafforzamento locale di nodi non confinati

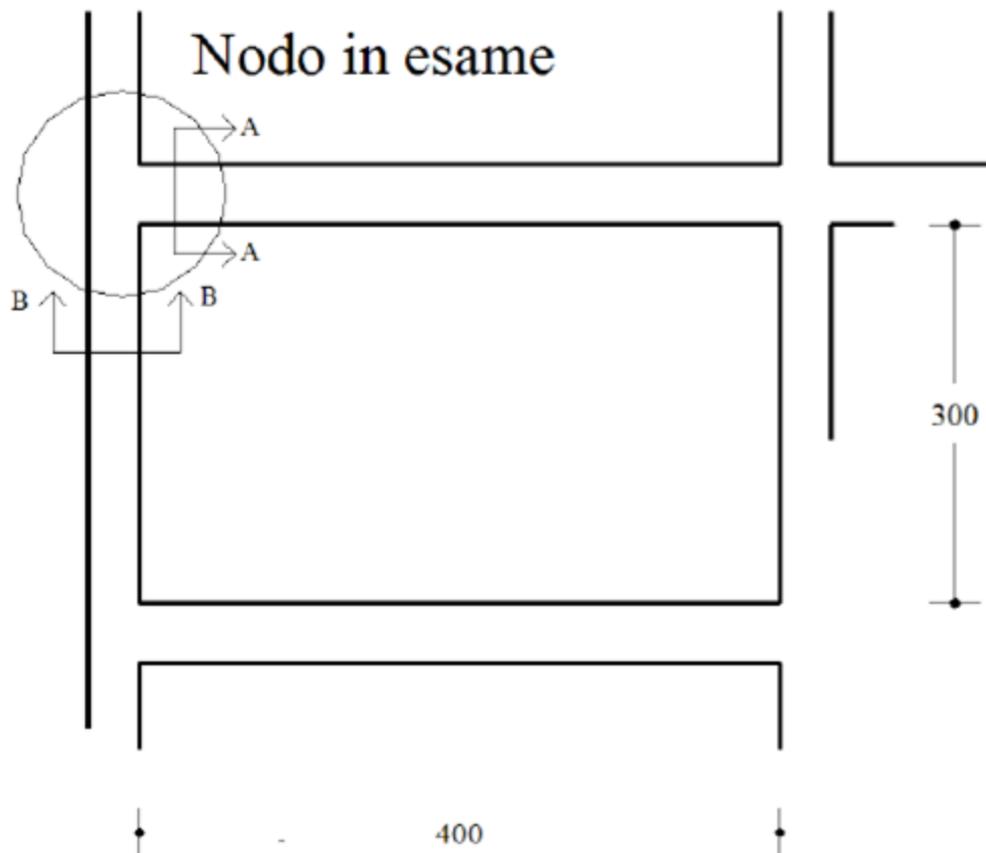
Incremento di resistenza a taglio delle travi.



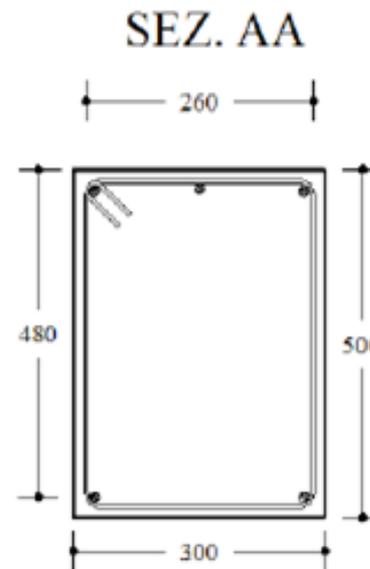
Interventi con FRP



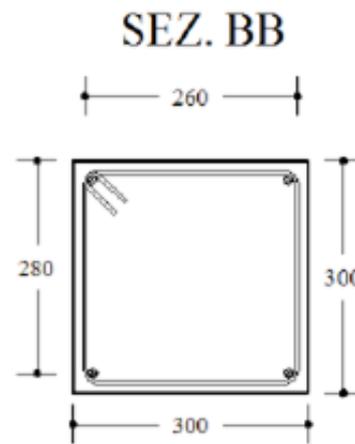
Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Nodo non staffato



trave 5Φ16 longitudinali



Pilastro 4Φ12 longitudinali

Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Per quanto concerne le resistenze dei materiali pre-esistenti, i valori di progetto X_d si ottengono a partire dai valori medi X_m (determinati, in relazione al livello di conoscenza, come valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca, ovvero da specifiche o certificati originali oppure da prove in-situ) come:

$$X_d = \frac{X_m}{\gamma_m \cdot FC}$$

γ_m , è unitario per il calcolo delle capacità di elementi duttili (verifiche flessionali) ed è pari al valore di normativa per il materiale in esame per elementi fragili (verifiche a taglio). Si ipotizza che nel caso in esame si abbia un livello di conoscenza 1 (LC1, conoscenza limitata), utilizzando quindi un fattore di confidenza $FC = 1,35$.

Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Si ipotizzano i seguenti valori medi delle caratteristiche dei materiali:

- Calcestruzzo $f_{cm} = 15$ MPa

- Acciaio ad aderenza migliorata $f_{ym} = 480$ MPa

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad \text{eq. 11.2.2 del D.M. 14/01/08}$$

$$f_{ctm} = 0.30 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad \text{eq. 11.2.3a del D.M. 14/01/08}$$

$$E_{cm} = 22000 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} \right)^{0.3} \quad \text{eq. 11.2.5 del D.M. 14/01/08}$$

Calcestruzzo (in MPa)			
f_{ck}	f_{cd}	f_{ctm}	E_{cm}
7	11.11 (per $\gamma_c = 1$)	1.10	$25 \cdot 10^3$

Acciaio (in MPa)
f_{yd}
355 (per $\gamma_s = 1$)

Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Dimensionamento del rinforzo per assorbire l'azione esercitata dalla tamponatura.

La componente orizzontale della forza di compressione sviluppabile dalla tamponatura in corrispondenza della crisi viene valutata come:

$$H_0 = \min \left(\frac{f_{vk0} \cdot l \cdot t}{0.6 \cdot \phi}; 0.8 \cdot \frac{f_k}{\phi} \cdot \cos^2 \theta \cdot \sqrt[4]{\frac{E_c}{E_m} \cdot I \cdot h \cdot t^3} \right)$$

Per il caso in esame si assume di avere laterizi forati con resistenza caratteristica a compressione dell'elemento $f_{bk}=7.5$ MPa e malta di classe M5, per uno spessore totale di 20 cm.

Dalla Tabella 11.10.VII del D.M. 14/01/08 si ottiene la resistenza caratteristica a taglio della muratura in assenza di tensioni normali f_{vko} pari a 0.2 MPa e una resistenza caratteristica a compressione della muratura (Tabella 11.10.V del D.M. 14/01/08 per i blocchi artificiali semipeni) f_k pari a 4.1 MPa.

Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



$$H_0 = \min \left(\frac{0.2 \cdot 4000 \cdot 200}{0.6 \cdot 1}; 0.8 \cdot \frac{4.1}{1} \cdot \cos^2 36.9^\circ \cdot \sqrt[4]{\frac{25}{4.1} \cdot 6.75 \cdot 10^8 \cdot 3000 \cdot 200^3} \right) =$$
$$= \min(266.667; 209.277) = 209 \text{ KN}$$

$$N = 0.2 \cdot b \cdot h \cdot f_{cd} = 200 \text{ KN} \quad \text{Sforzo normale nel pilastro}$$

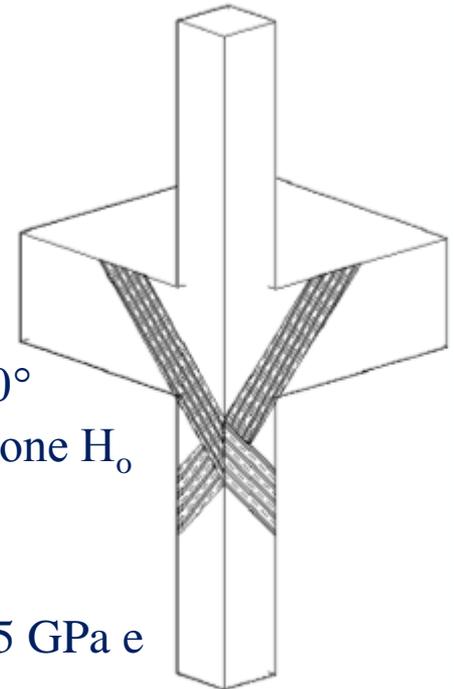
$$H_0 = \max \left(\frac{H_0}{2}; H_0 - 0.4 \cdot N \right) = \max \left(\frac{209}{2}; 209 - 0.4 \cdot 200 \right) = 129 \text{ KN}$$

L'inclinazione delle fibre rispetto all'asse della trave si progetta a 30°
Si calcola dunque la forza in direzione delle fibre per assorbire l'azione H_0
 $H_0 / \cos 30^\circ \approx 149 \text{ kN}$

caratteristiche meccaniche tessuto in fibra metallica :

- resistenza di progetto pari a 1,700 MPa, modulo elastico pari a 195 GPa e deformazione ultima pari a 0.87%.

Per assorbire la forza calcolata, è necessaria un'area di almeno $149,000 / 1,700 = 88 \text{ mm}^2$
(corrispondente ad una larghezza di circa 24 cm)



Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Valutazione dell'incremento della resistenza a taglio del pannello di nodo.

L'incremento di resistenza a taglio del pannello di nodo è conseguito mediante disposizione di tessuto quadriassiale in carbonio. Si fa riferimento alle verifiche di resistenza dei nodi trave-pilastro (paragrafo 7.4.4.3.1 del D.M. 14/01/08), in cui la resistenza del nodo a seguito della fessurazione diagonale, può essere garantita integralmente da staffe orizzontali.

$$A_{Sh} \cdot f_{ywd} \geq \gamma_{Rd} \cdot A_{s2} \cdot f_{yd} \cdot (1 - 0.8 \cdot v_d)$$

in cui il termine $A_{sh} \cdot f_{ywd}$ va sostituito con lo sforzo in direzione orizzontale dovuto al tessuto quadriassiale.

La deformazione di progetto del composito in accordo alle CNR DT-200 è data da:

$$\varepsilon_{fd} = \min \left(\eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}; 0.004 \right)$$

Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Valutazione dell'incremento della resistenza a taglio del pannello di nodo.

Tabella 3-4 – Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e vari sistemi di 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

Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Valutazione dell'incremento della resistenza a taglio del pannello di nodo.

Tabella 3-2 – Coefficienti parziali γ_m per i materiali ed i prodotti.

Modalità 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 in accordo a quanto indicato al capitolo 2 di queste Istruzioni (§ 2.5).

⁽²⁾ Sistemi di rinforzo non certificati in accordo a quanto indicato al capitolo 2 di queste Istruzioni (§ 2.5).

Le fibre sono ancorate grazie alle fasciature successive poste su travi e pilastri e quindi si può far riferimento ad una crisi per rottura e non per delaminazione, da cui $\gamma_f = 1.10$

Deformazione caratteristica di rottura a trazione $\varepsilon_{fk} = 1.4\%$ e modulo elastico $E_f = 230$ GPa.

$$\varepsilon_{fd} = \min\left(0.85 \cdot \frac{0.014}{1.10}; 0.004\right) = \min(0.011; 0.004) = 0.4\%$$

Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Valutazione dell'incremento della resistenza a taglio del pannello di nodo.

Quindi come ben noto per i compositi, elastici lineari fino a rottura, si ha una resistenza di progetto

$$f_{fd} = \varepsilon_{fd} \cdot E_f = 0.004 \cdot 230000 = 920 \text{ MPa}$$

Si assuma inoltre di adoperare due strati di tessuto quadriassiale con spessore secco in ogni direzione pari a 0.106 mm e quindi lo spessore del tessuto di calcolo è $t_f = 2 \cdot 0.106 \text{ mm} = 0.212 \text{ mm}$.

Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



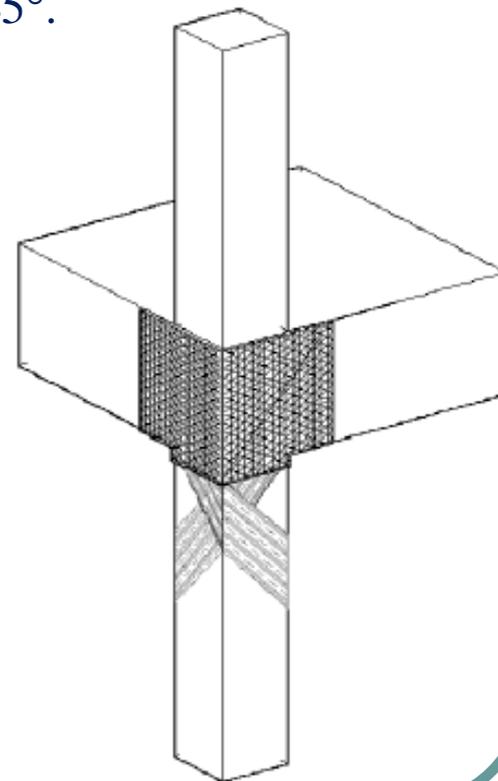
Valutazione dell'incremento della resistenza a taglio del pannello di nodo.

In direzione orizzontale si ha l'azione delle fibre disposte orizzontalmente più le componenti orizzontali delle fibre disposte nelle due direzioni $\pm 45^\circ$.

$$\begin{aligned} \{A_{sh} \cdot f_{ywd}\} &= t_f \cdot h_{trave} \cdot f_{fd} + 2 \cdot (t_f \cdot h_{trave} \cdot f_{fd} \cdot \cos 45^\circ) = \\ &= 0.212 \cdot 500 \cdot 920 + 2 \cdot (0.212 \cdot 500 \cdot 920 \cdot \cos 45^\circ) = 235.4 \text{ KN} \end{aligned}$$

Al secondo termine della disuguaglianza (eq. 7.4.12) risulta $A_{s2} = 402 \text{ mm}^2$, area dell'armatura inferiore della trave composta da $2\Phi 16$.

$$\begin{aligned} A_{sh} \cdot f_{ywd} &= 235.4 \geq \gamma_{Rd} \cdot A_{s2} \cdot f_{yd} \cdot (1 - 0.8 \cdot v_d) = \\ &= 1.2 \cdot 402 \cdot 355 \cdot (1 - 0.8 \cdot 0.2) = 143.8 \text{ KN} \end{aligned}$$



Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Valutazione dell'incremento di duttilità del calcestruzzo e della resistenza a taglio dei pilastri.

Il confinamento delle estremità dei pilastri viene realizzato mediante fasciatura continua in tessuto in carbonio unidirezionale.

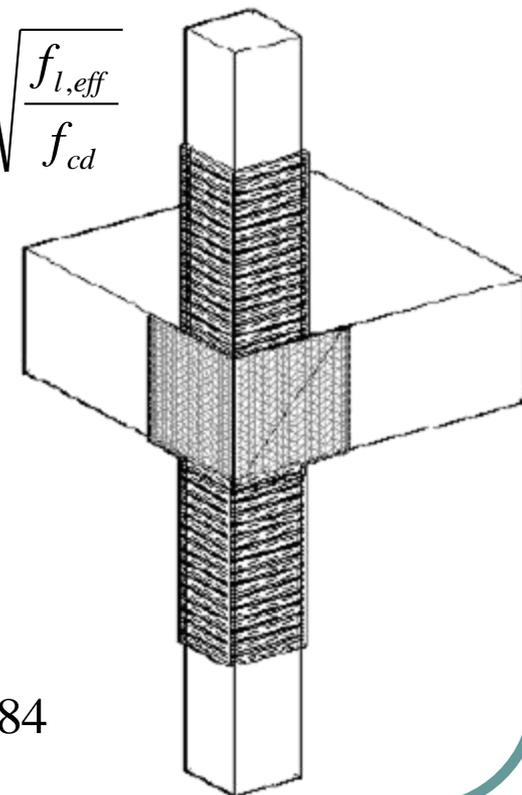
Capacità deformativa del calcestruzzo: $\varepsilon_{ccu} = 0.0035 + 0.015 \cdot \sqrt{\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}}}$

Tessuto di carbonio unidirezionale con deformazione caratteristica di rottura a trazione $\varepsilon_{fk} = 1.4\%$ e modulo elastico $E_f = 230$ GPa, spessore del tessuto secco $t_f = 0.166$ mm (grammatura di 300 g/m²).

Deformazione ridotta di calcolo:

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

$$\varepsilon_{fd,rid} = 0.85 \cdot \frac{0.014}{1.1} = 0.011 \leq 0.6 \cdot 0.014 = 0.0084$$



Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Valutazione dell'incremento di duttilità del calcestruzzo e della resistenza a taglio dei pilastri.

Tabella 3-4 – Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e vari sistemi di 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

Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Valutazione dell'incremento di duttilità del calcestruzzo e della resistenza a taglio dei pilastri.

Percentuale geometrica di rinforzo per fasciatura continua:

$$\rho_f = 2 \cdot t_f \cdot \frac{b+d}{b \cdot d} = 2 \cdot 0.166 \cdot \frac{300+300}{300 \cdot 300} = 0.0022$$

La pressione di confinamento è quindi valutata come:

$$f_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid} = \frac{1}{2} \cdot 0.0022 \cdot 230000 \cdot 0.0084 = 2.14 \text{ MPa}$$

Il coefficiente di efficienza orizzontale vale invece:

$$K_H = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3 \cdot A_g} = 1 - \frac{260^2 + 260^2}{3(300 \cdot 300)} = 0.499 \quad K_{eff} = K_H \cdot K_V \cdot K_\alpha = 0.499 \cdot 1 \cdot 1 = 0.499$$

Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Valutazione dell'incremento di duttilità del calcestruzzo e della resistenza a taglio dei pilastri.

La pressione efficace di confinamento è pertanto pari a:

$$f_{l,eff} = K_{eff} \cdot f_l = 0.499 \cdot 2.125 = 1.07 \text{ MPa}$$

La deformazione ultima di progetto, ε_{ccu} , del calcestruzzo confinato è quindi:

$$\varepsilon_{ccu} = 0.0035 + 0.015 \cdot \sqrt{\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}}} = 0.0035 + 0.015 \cdot \sqrt{\frac{1.07}{11.11}} = 0.0081 = 0.81\%$$

Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Valutazione dell'incremento di duttilità del calcestruzzo e della resistenza a taglio dei pilastri.

Incremento di resistenza a taglio del pilastro

Si procede assumendo una inclinazione costante delle bielle di calcestruzzo pari a $\theta=45^\circ$.

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

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

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

Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Valutazione dell'incremento di duttilità del calcestruzzo e della resistenza a taglio dei pilastri.

Incremento di resistenza a taglio del pilastro

La f_{fd} è la resistenza di progetto a rottura del rinforzo di FRP, da valutarsi a partire dalle proprietà del composito unidirezionale, come:

$$f_{fd} = \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk} \cdot E_f}{\gamma_f} = 0.85 \cdot \frac{0.014 \cdot 230000}{1.1} = 2.488 \text{ MPa}$$

$$\phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b_w} = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{20}{300} = 0.307$$

$$0 \leq \frac{r_c}{b_w} = \frac{20}{300} = 0.066 \leq 0.5$$

Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Valutazione dell'incremento di duttilità del calcestruzzo e della resistenza a taglio dei pilastri.

Incremento di resistenza a taglio del pilastro

Resistenza di progetto alla delaminazione:

$$f_{fdd} = \frac{0.24}{\gamma_{f,d} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{cm}}}{t_f}} = \frac{0.24}{1.2 \cdot \sqrt{1.5}} \cdot \sqrt{\frac{230000 \cdot 1 \cdot \sqrt{7 \cdot 1.10}}{0.166}} = 320 \text{ MPa}$$

La lunghezza ottimale di ancoraggio può essere calcolata come:

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{cm}}} = \sqrt{\frac{230000 \cdot 0.166}{2 \cdot 1.10}} = 132 \text{ mm}$$

Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Valutazione dell'incremento di duttilità del calcestruzzo e della resistenza a taglio dei pilastri.

Incremento di resistenza a taglio del pilastro

La resistenza efficace di calcolo del rinforzo è quindi:

$$f_{fed} = 320 \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{132 \cdot 1}{\min\{0.9 \cdot 280; 300\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (0.307 \cdot 2488 - 320) \cdot \left[1 - \frac{132 \cdot 1}{\min\{0.9 \cdot 280; 300\}} \right] = 292 + 106 = 398 \text{ MPa}$$

Il contributo a taglio della fasciatura vale:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{1.2} \cdot 0.9 \cdot 280 \cdot 398 \cdot 2 \cdot 0.166 \cdot (0 + 1) = 27.7 \text{ KN}$$

Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Valutazione dell'incremento della resistenza a taglio delle estremità delle travi.

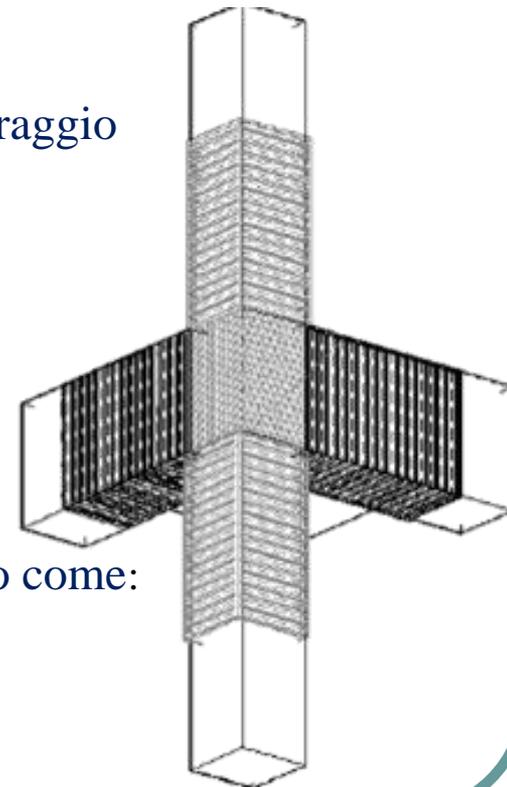
Essa può essere realizzata mediante una fasciatura ad U con tessuto in carbonio unidirezionale.

La realizzazione di tale rinforzo a taglio funge anche da ancoraggio per il rinforzo con tessuto quadriassiale del pannello di nodo.

Si opera ancora con il medesimo tessuto di carbonio unidirezionale con deformazione caratteristica di rottura a trazione $\varepsilon_{fk} = 1.4\%$ e modulo elastico $E_f = 230$ GPa, spessore del tessuto secco $t_f = 0.166$ mm (grammatura di 300 g/m²).

Il contributo a taglio della fasciatura in FRP sulla trave è valutato come:

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



Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Valutazione dell'incremento della resistenza a taglio delle estremità delle travi.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare, la resistenza efficace di calcolo del rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d; h_w\}} \right]$$

Qui h_w è dato da $h_{trave} - h_{soal}$ e quindi assumendo un solaio di 200 mm si ha $h_w = 300$ mm.

Resistenza di progetto alla delaminazione:

$$f_{fdd} = \frac{0.24}{\gamma_{f,d} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{cm}}}{t_f}} = \frac{0.24}{1.2 \cdot \sqrt{1.5}} \cdot \sqrt{\frac{230000 \cdot 1 \cdot \sqrt{7 \cdot 1.10}}{0.166}} = 320 \text{ MPa}$$

Interventi con FRP



Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni



Valutazione dell'incremento della resistenza a taglio delle estremità delle travi.

La lunghezza ottimale di ancoraggio può essere calcolata come:

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{cm}}} = \sqrt{\frac{230000 \cdot 0.166}{2 \cdot 1.10}} = 132 \text{ mm}$$

La resistenza efficace di calcolo del rinforzo è quindi:

$$f_{fed} = 320 \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{132 \cdot 1}{\min\{0.9 \cdot 480; 300\}} \right] = 273 \text{ MPa}$$

Il contributo a taglio della fasciatura vale:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{1.2} \cdot 0.9 \cdot 480 \cdot 273 \cdot 2 \cdot 0.166 \cdot (0 + 1) = 32.6 \text{ KN}$$