

***All In One: Vulnerabilità ed adeguamento di
strutture esistenti in cemento armato e muratura
anche con l'ausilio di materiali fibrorinforzati***



Antonella Giordano

*Dipartimento di Ingegneria Civile
Università degli Studi di Salerno*

angiordano@unisa.it

Roma, 29 novembre 2012

Impiego dei materiali compositi nell'Ingegneria Civile

- In Italia l'utilizzo dei materiali compositi fibrorinforzati, comunemente denominati FRP (*Fiber Reinforced Polymer*), ha soprattutto interessato il settore della riabilitazione strutturale.
- Nel D.M. 14 gennaio 2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni, NTC) non è avvenuto il riconoscimento auspicato dei materiali compositi, come materiali strutturali, il cui uso è stato invece subordinato al rilascio di specifici benestari tecnici da parte del Ministero delle Infrastrutture.
- Sono esclusi da tali procedure i soli impieghi per interventi su costruzioni esistenti purché rispettosi di normative e documenti di comprovata validità, come ad esempio le istruzioni e i documenti tecnici del CNR (§8.6 del DM 14/01/2008).

Valutazione della resistenza nei confronti della delaminazione

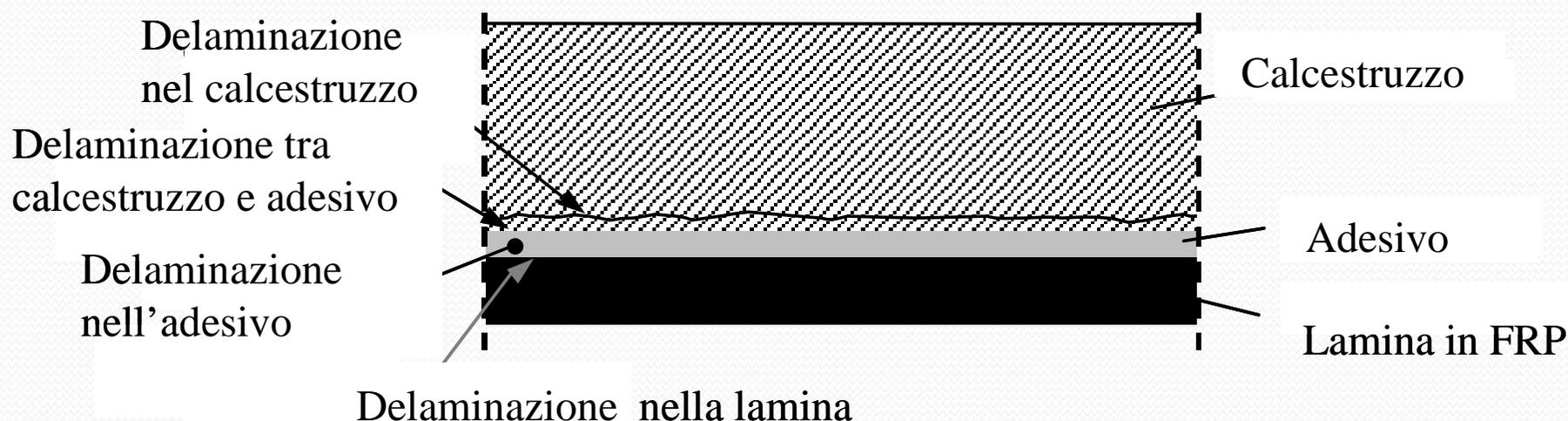
Meccanismi di rottura per delaminazione

- 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**.
- 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**.

Valutazione della resistenza nei confronti della delaminazione

Meccanismi di rottura per delaminazione

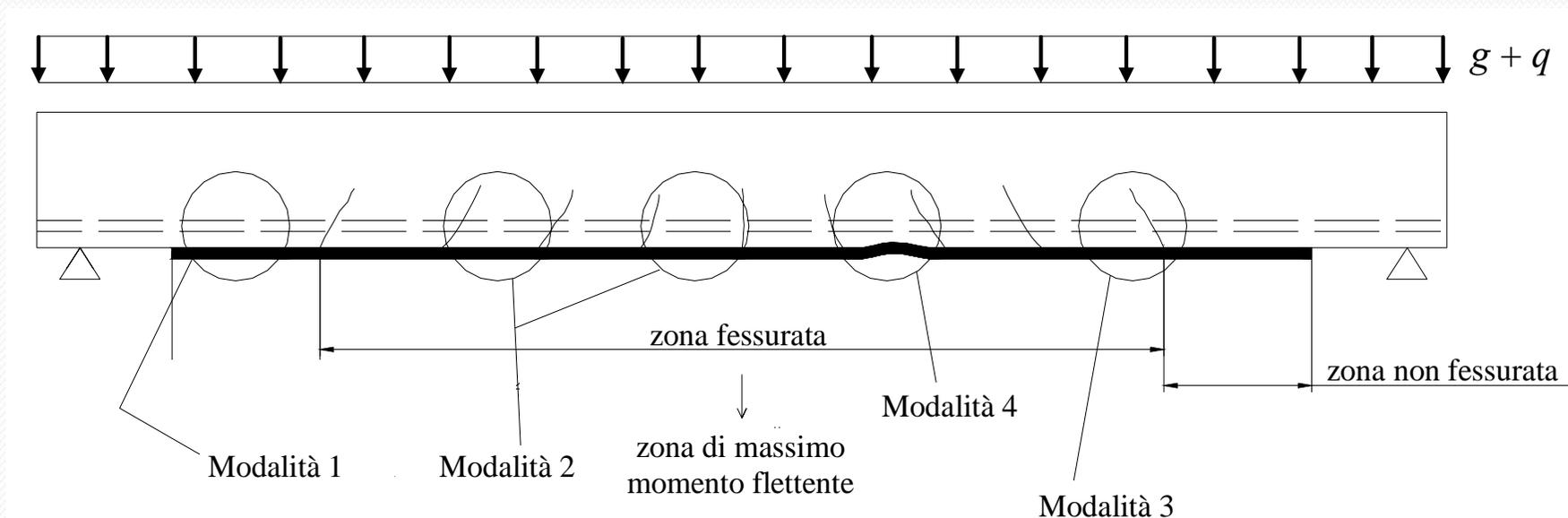
- In linea di principio, la **delaminazione** può prodursi all'interno dell'adesivo, tra calcestruzzo ed adesivo, nel calcestruzzo o all'interno del rinforzo (ad esempio tra strati di tessuto orditi con differenti angoli di inclinazione delle fibre).



Valutazione della resistenza nei confronti della delaminazione

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).



Valutazione della resistenza nei confronti della delaminazione

Meccanismi di rottura per delaminazione

- La verifica di sicurezza nei confronti della crisi per delaminazione richiede la valutazione:
 - della **massima forza trasmissibile dal calcestruzzo al rinforzo (SLU)**;
 - delle **tensioni, sia tangenziali che normali, mobilitate all'interfaccia calcestruzzo-FRP (SLE)**.

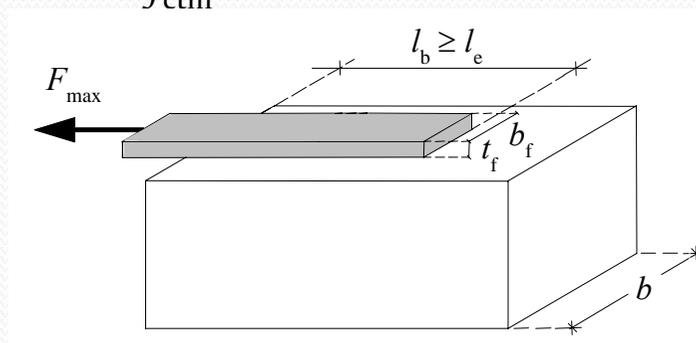
Valutazione della resistenza nei confronti della delaminazione

Meccanismi di rottura per delaminazione (slu) – Modalità 1

- Con riferimento ad una tipica prova di aderenza, il **valore ultimo della forza sopportabile dal rinforzo di FRP**, prima che subentri la delaminazione, dipende, a parità di tutte le altre condizioni, **dalla lunghezza, l_b , della zona incollata**.
- Il **valore ultimo della forza sopportabile dal rinforzo di FRP** cresce con l_b fino ad attingere un massimo corrispondente ad una ben definita lunghezza, l_e – **lunghezza ottimale di ancoraggio** – valutabile come:

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ctm}}} \quad [\text{lunghezze in mm}]$$

dove E_f e t_f sono, rispettivamente, il modulo di elasticità normale nella direzione della forza e lo spessore del composito fibrorinforzato ed f_{ctm} è la resistenza media a trazione del calcestruzzo costituente il supporto.



Valutazione della resistenza nei confronti della delaminazione

Meccanismi di rottura per delaminazione (slu) – Modalità 1

- Con riferimento ad una delaminazione per modalità 1 e per **lunghezze di ancoraggio maggiori o uguali a quella ottimale**, la **tensione di progetto del rinforzo, f_{dd}** , ovvero il valore della massima tensione alla quale il rinforzo può lavorare nella **sezione terminale di ancoraggio** - una volta avvenuto il trasferimento degli sforzi dal calcestruzzo al rinforzo di FRP - vale:

$$f_{dd} = \frac{1}{\gamma_{f,d} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fk}}{t_f}}$$

essendo $\gamma_{f,d}$ il coefficiente parziale indicato in Tabella 3-2, γ_c il coefficiente parziale del calcestruzzo e Γ_{Fk} l'energia specifica di frattura.

$$\Gamma_{Fk} = 0.03 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}} \quad [\text{forze in N, lunghezze in mm}]$$

k_b è un fattore di tipo geometrico il cui valore è funzione della larghezza della trave rinforzata, b , e di quella del rinforzo, b_f . (per $b_f / b < 0.33$ si adotta il valore di k_b corrispondente a $b_f / b = 0.33$)

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1$$

Classificazione dei sistemi di rinforzo

- I sistemi di FRP idonei per il rinforzo esterno di strutture possono essere classificati dal punto di vista tipologico come di seguito specificato:
 - ❖ Sistemi preformati (*precured systems*);
 - ❖ Sistemi impregnati *in situ* (*wet lay-up systems*);
 - ❖ Sistemi preimpregnati (*prepreg systems*).
- Il documento CNR n.200 distingue i sistemi di rinforzo in **applicazioni di tipo A** e di **tipo B**. Appartengono al primo tipo i sistemi di rinforzo di cui siano **certificati sia i materiali che il sistema completo** applicato ad un substrato definito. Appartengono al secondo tipo i sistemi di cui siano **certificati i soli materiali**.

Valutazione della resistenza nei confronti della delaminazione

Meccanismi di rottura per delaminazione (slu) – Modalità 1

- Nel caso di lunghezze di ancoraggio, l_b , minori di quella ottimale, l_e , la tensione di progetto deve essere opportunamente ridotta in accordo con la relazione:

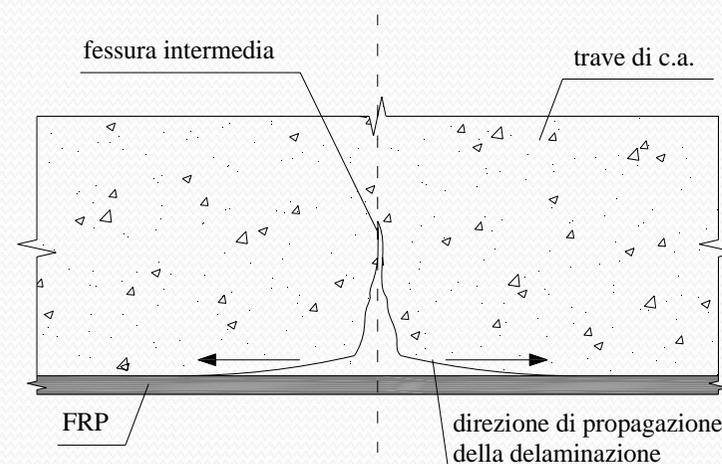
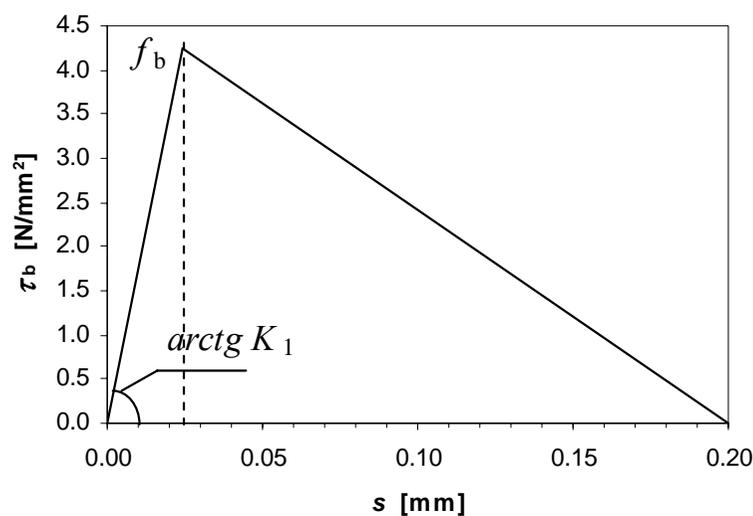
$$f_{\text{fdd,rid}} = f_{\text{fdd}} \cdot \frac{l_b}{l_e} \cdot \left(2 - \frac{l_b}{l_e} \right)$$

- Quando si faccia ricorso a **particolari dispositivi di ancoraggio** (barre trasversali di composito, fasciatura dell'estremità mediante tessuti, ecc.), la forza massima di ancoraggio deve essere valutata mediante apposite indagini sperimentali.

Valutazione della resistenza nei confronti della delaminazione

Meccanismi di rottura per delaminazione (slu) – Modalità 2

- Allo scopo di prevenire il meccanismo di delaminazione secondo la modalità 2, si può verificare che la **variazione di tensione $\Delta\sigma_f$ nel rinforzo di FRP tra due fessure consecutive non superi un opportuno valore limite $\Delta\sigma_R$** , dipendente dalle caratteristiche del **legame di aderenza**, dalla **distanza tra le fessure** e dal **livello di tensione σ_f nel rinforzo**.



Valutazione della resistenza nei confronti della delaminazione

Meccanismi di rottura per delaminazione (slu) – Modalità 2

- In alternativa, è possibile ricorrere ad una **procedura semplificata** consistente nel verificare che allo SLU la tensione nel composito fibrorinforzato non ecceda un valore massimo, $f_{\text{fdd},2}$, fornito dalla seguente relazione:

$$f_{\text{fdd},2} = k_{\text{cr}} \cdot f_{\text{fdd}} = \frac{k_{\text{cr}}}{\gamma_{\text{f,d}} \cdot \sqrt{\gamma_{\text{c}}}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{f}} \cdot \Gamma_{\text{Fk}}}{t_{\text{f}}}}$$

nella quale, in mancanza di dati specifici, il coefficiente k_{cr} può essere assunto pari a 3.0.

Il corrispondente valore della deformazione di progetto del composito fibrorinforzato, ε_{fdd} , vale:

$$\varepsilon_{\text{fdd}} = \frac{f_{\text{fdd},2}}{E_{\text{f}}}$$

Valutazione della resistenza nei confronti della delaminazione

Verifica delle tensioni di interfaccia (SLE)

- Si deve controllare che, **all'interfaccia adesivo-calcestruzzo in prossimità delle estremità del rinforzo**, per la combinazione di carico rara o frequente, la tensione tangenziale “equivalente”, $\tau_{b,e}$, sia inferiore alla resistenza di adesione tra il rinforzo ed il substrato di calcestruzzo, f_{bd} :

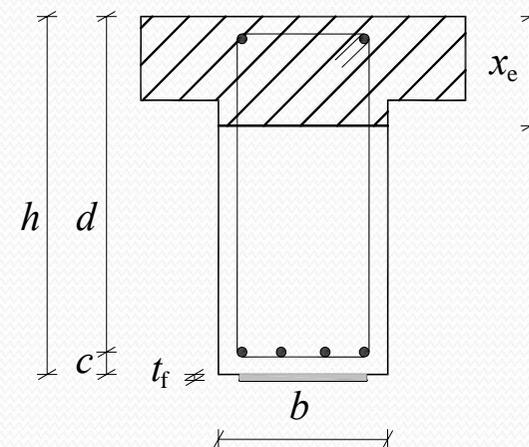
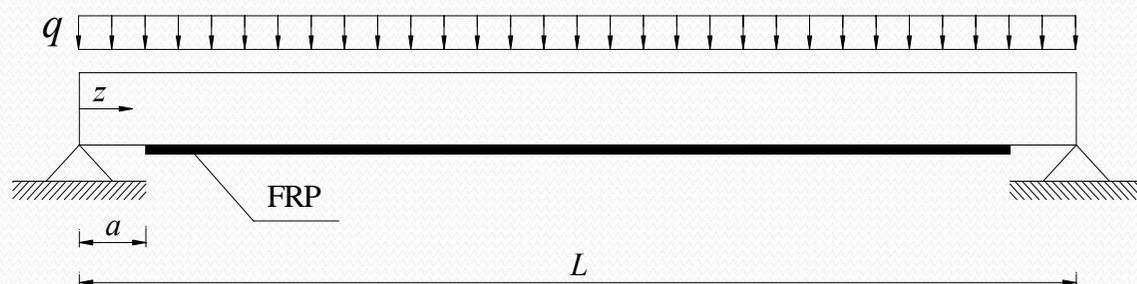
$$\tau_{b,e} \leq f_{bd}$$

dove:

$$\tau_{b,e} = k_{id} \cdot \tau_m$$

$$\tau_m = \frac{V_{(z=a)} \cdot t_f \cdot (h - x_e)}{I_c / n_f}$$

$$n_f = E_f / E_c$$



Valutazione della resistenza nei confronti della delaminazione

Verifica delle tensioni di interfaccia (SLE)

- Determinazione della resistenza di adesione tra il rinforzo ed il substrato di calcestruzzo, f_{bd} :

$$f_{bd} = k_b \cdot \frac{f_{ctk}}{\gamma_b}$$

dove:

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1$$

Coefficiente parziale	Combinazione di carico
$\gamma_b = 1.0$	Rara
$\gamma_b = 1.2$	frequente

Rinforzo a flessione

Generalità

- Il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere eseguito applicando **una o più lamine**, ovvero **uno o più strati di tessuto**, al lembo teso dell'elemento da rinforzare.



Rinforzo a flessione

Generalità

- 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:

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

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

Rinforzo a flessione

Analisi del comportamento allo stato limite ultimo - Generalità

- L'intervento di rinforzo **risulta efficace per sezioni a debole armatura**.
- 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 definiti rispettivamente nella Tabella 3-2 e nella Tabella 3-4 del DT200, ε_{fdd} è la deformazione massima per delaminazione intermedia (generalmente il valore minimo corrisponde ad ε_{fdd}).

Rinforzo a flessione

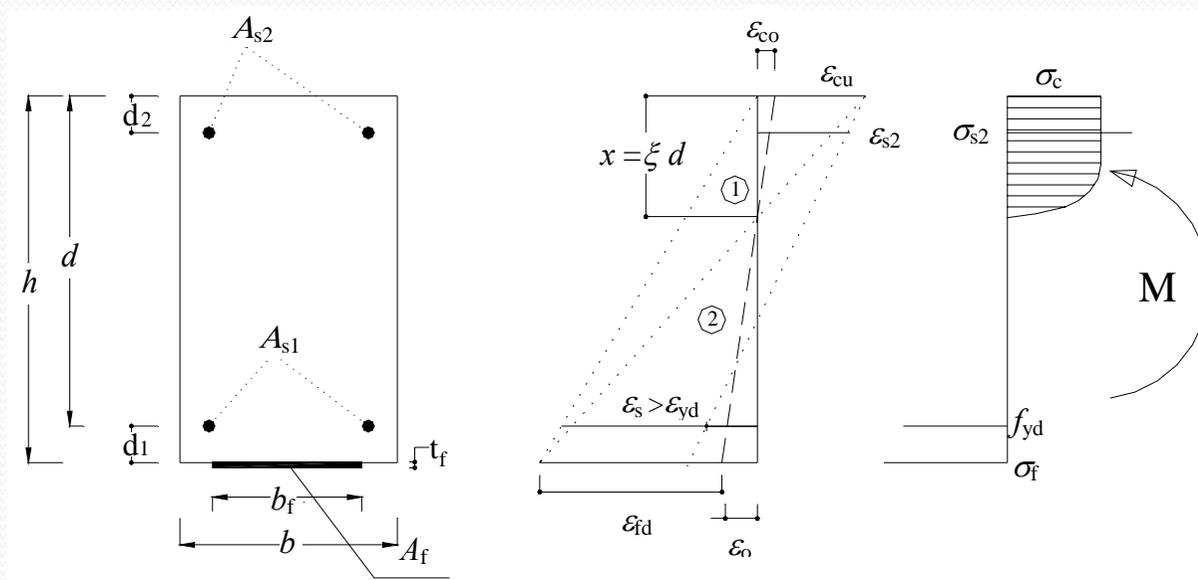
Analisi del comportamento allo stato limite ultimo – Calcolo della resistenza di progetto a flessione dell'elemento rinforzato con FRP

- Nell'ipotesi che il rinforzo di FRP sia applicato su un **elemento soggetto ad una sollecitazione preesistente**, cui corrisponda un momento applicato M_o si deve procedere alla valutazione dello stato deformativo iniziale se $M_o > M_{fess}$.
- In caso contrario, lo stato deformativo iniziale può essere **di norma trascurato**.
- Le deformazioni significative sono **quella al lembo compresso, ε_{co}** , e **quella al lembo teso, ε_o** , dove viene applicato il rinforzo di FRP, da ricavarsi in base alla linearità del diagramma delle deformazioni normali sulla sezione retta.

Rinforzo a flessione

Analisi del comportamento allo stato limite ultimo – Calcolo della resistenza di progetto a flessione dell'elemento rinforzato con FRP

- Nella zona 1 la rottura si attinge per **raggiungimento della deformazione (dilatazione) 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} .



$$\varepsilon_f = \varepsilon_{fd}$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_o) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \varepsilon_{cu}$$

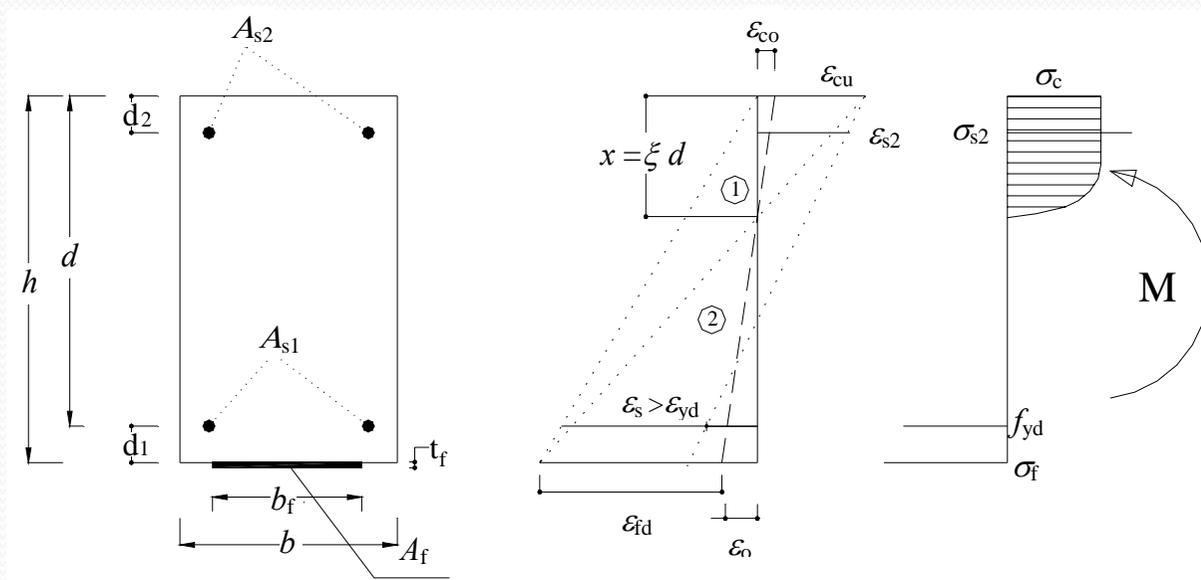
$$\varepsilon_{s1} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_o) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$$

$$\varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_o) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$$

Rinforzo a flessione

Analisi del comportamento allo stato limite ultimo – Calcolo della resistenza di progetto a flessione dell'elemento rinforzato con FRP

- Nella zona 2 la rottura avviene per **schacciamento 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})



$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} \cdot (h - x) - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fd}$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$$

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

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

Rinforzo a flessione

Analisi del comportamento allo stato limite ultimo – Calcolo della resistenza di progetto a flessione dell'elemento rinforzato con FRP

- Le due equazioni da utilizzare per la risoluzione del problema sono quella di **equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave** e quella di **equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese e parallelo all'asse neutro**.

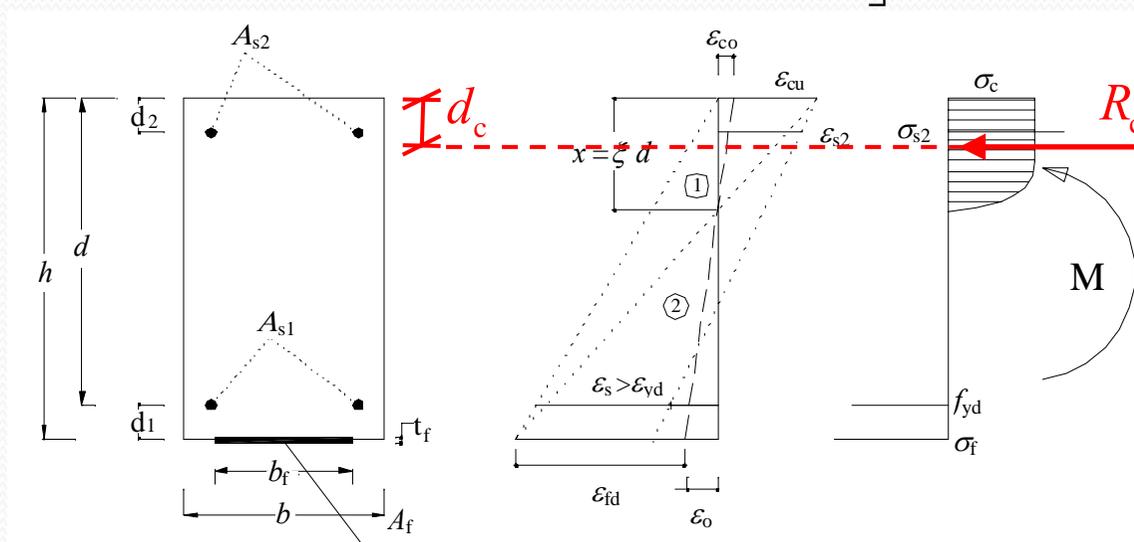
$$0 = \psi \cdot b \cdot x \cdot \overline{f_{cd}} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot f_{yd} - A_f \cdot \sigma_f$$

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

$$\psi = \frac{R_c}{b \cdot x \cdot \overline{f_{cd}}}$$

$$\lambda = \frac{d_c}{x}$$

$$\left(\overline{f_{cd}} = 0.85 \cdot f_{cd} \right)$$



Rinforzo a flessione

Analisi del comportamento agli stati limite di esercizio

Gli SLE più comuni da verificare sono quelli relativi a:

- limitazione delle tensioni;
 - controllo dell'inflessione;
 - controllo della fessurazione.
-
- Le verifiche in condizioni di esercizio possono essere svolte in campo **elastico-lineare** tenendo conto sia del comportamento per sezione interamente reagente che per sezione fessurata.
 - Va tenuta in conto l'eventuale **deformazione preesistente** al momento dell'applicazione del rinforzo.
 - Le tensioni nei materiali sono valutabili per **sovrapposizione degli effetti**.

Rinforzo a flessione

Analisi del comportamento agli stati limite di esercizio

Le ipotesi alla base del calcolo sono:

- comportamento elastico lineare omogeneo dei materiali;
- conservazione della pianeità delle sezioni rette;
- assenza di scorrimenti (perfetta aderenza) tra calcestruzzo ed armatura metallica, nonché tra calcestruzzo e rinforzo di FRP.

Rinforzo a flessione

Analisi del comportamento agli stati limite di esercizio – verifica delle tensioni

- In condizioni di esercizio le tensioni nel composito fibrorinforzato, calcolate per la **combinazione di carico quasi permanente**, devono soddisfare la limitazione $\sigma_f \leq \eta \cdot f_{fk}$, essendo f_{fk} la tensione caratteristica di rottura del rinforzo ed η il fattore di conversione, i cui valori sono suggeriti nel § 3.5.
- In presenza di un momento **M_o agente sulla sezione all'atto dell'applicazione del rinforzo** e di un momento **M_1 dovuto ai carichi applicati dopo l'intervento**, le tensioni indotte dal momento complessivo $M=M_o+M_1$ possono essere valutate in maniera additiva, nel modo seguente:
 - tensioni nel calcestruzzo: $\sigma_c = \sigma_{co} + \sigma_{c1}$, $\sigma_{co} = M_o/W_{o,cs}$, $\sigma_{c1} = M_1/W_{1,cs}$;
 - tensioni nell'acciaio teso: $\sigma_s = \sigma_{so} + \sigma_{s1}$, $\sigma_{so} = n_s M_o/W_{o,si}$, $\sigma_{s1} = n_s M_1/W_{1,si}$;
 - tensioni nelle fibre: $\sigma_f = n_f M_1/W_{1,fi}$.

Rinforzo a taglio

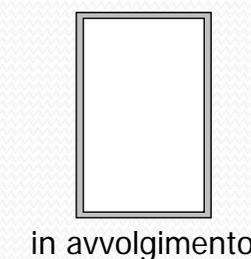
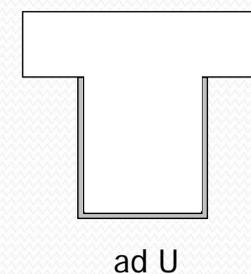
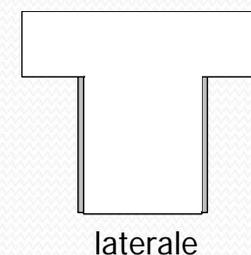
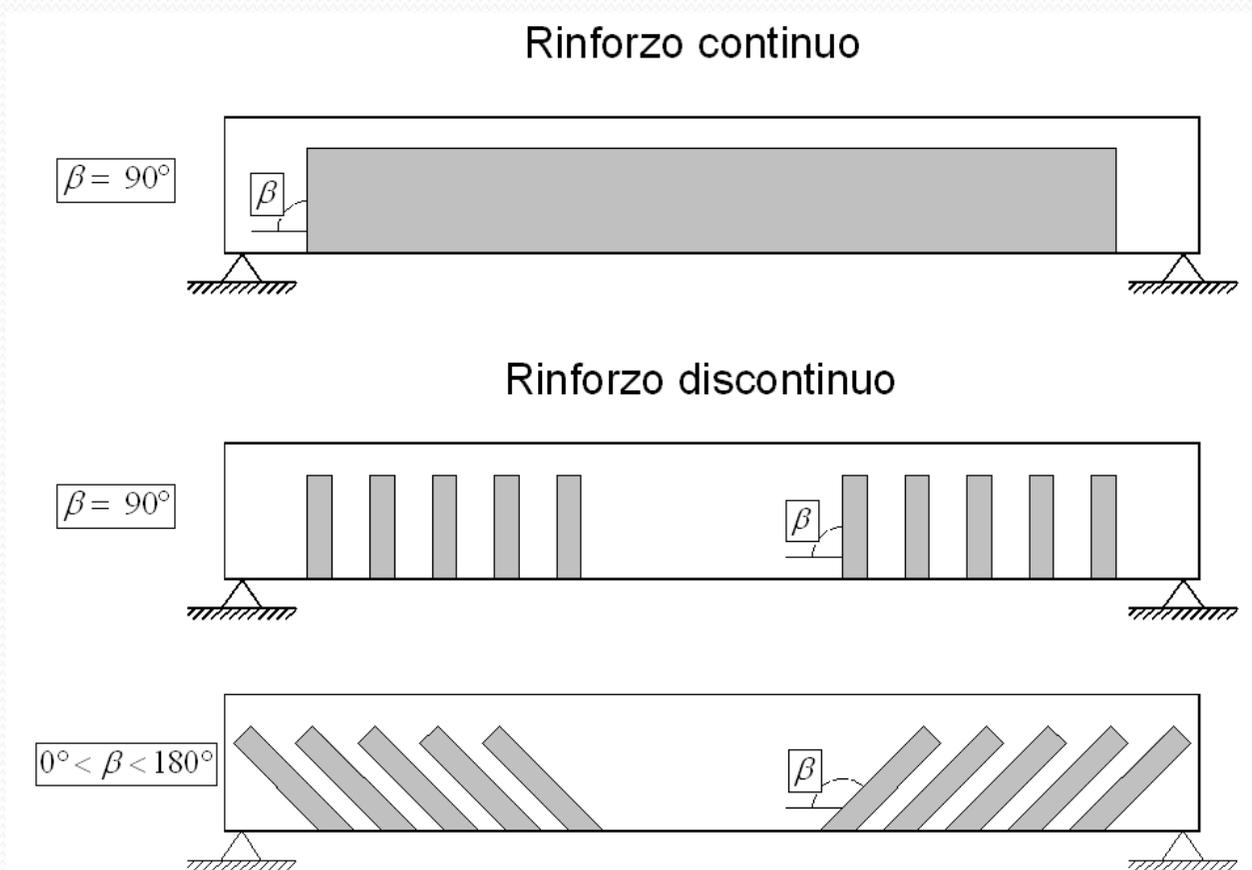
Generalità

- 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.
- Il **rinforzo a taglio va verificato per il solo SLU**.



Rinforzo a taglio

Configurazioni per il rinforzo a taglio



Rinforzo a taglio

Configurazioni per il rinforzo a taglio

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

Rinforzo a taglio

Resistenza di progetto a taglio

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

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

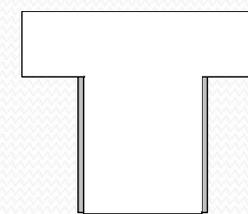
dove $V_{Rd,s}$ è il contributo dell'armatura trasversale di acciaio, da valutarsi in accordo con la Normativa vigente ponendo l'angolo di inclinazione delle fessure da taglio rispetto all'asse dell'elemento, θ , pari a 45° ; $V_{Rd,f}$ è il contributo del rinforzo di FRP, da valutarsi come indicato nel seguito; $V_{Rd,c}$ è la resistenza della biella compressa di calcestruzzo, da valutarsi in accordo con la Normativa vigente.

Rinforzo a taglio

Resistenza di progetto a taglio

- Rinforzo laterale

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot \min \{ 0.9 \cdot d, h_w \} \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot \frac{\sin \beta}{\sin \theta} \cdot \frac{w_f}{p_f}$$

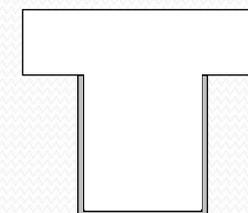


laterale

- Rinforzo ad U o in avvolgimento

f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del rinforzo

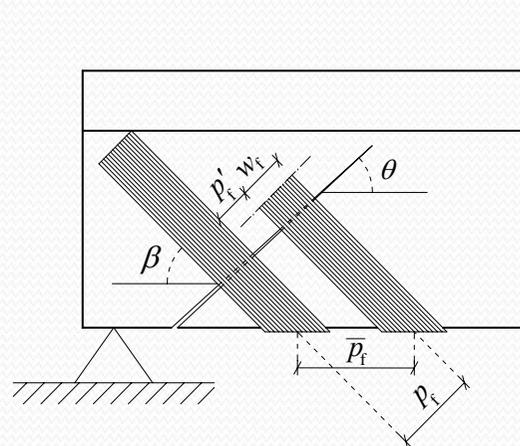
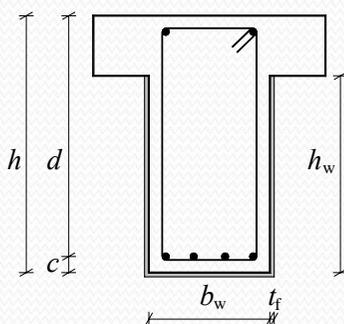
$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \frac{w_f}{p_f}$$



ad U



in avvolgimento



Rinforzo a taglio

Resistenza di progetto a taglio

Resistenza efficace di calcolo del rinforzo

- Rinforzo laterale

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \frac{z_{rid,eq}}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \cdot \left(1 - 0.6 \cdot \sqrt{\frac{l_{eq}}{z_{rid,eq}}}\right)^2$$

$$z_{rid,eq} = z_{rid} + l_{eq}, \quad z_{rid} = \min\{0.9 \cdot d, h_w\} - l_e \cdot \sin \beta, \quad l_{eq} = \frac{S_f}{f_{fdd} / E_f} \cdot \sin \beta$$

S_f è lo scorrimento ultimo di delaminazione da assumersi pari a 0.2 mm

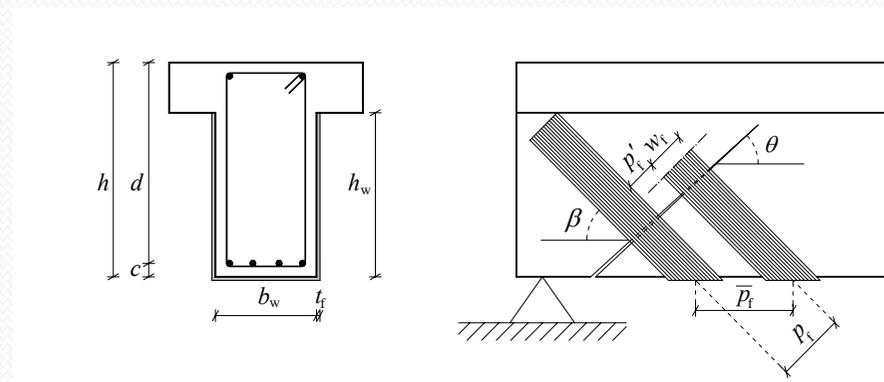
- Rinforzo ad U

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

- Rinforzo in avvolgimento

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

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



Rinforzo a taglio

Limitazioni e dettagli costruttivi

- Nel caso di disposizione ad U ed in avvolgimento, gli **spigoli della sezione dell'elemento da rinforzare a contatto con il materiale composito devono essere arrotondati, in modo da evitare il tranciamento del rinforzo. Il raggio di curvatura, r_c , dell'arrotondamento deve essere non minore di 20 mm.**
- Nel caso di rinforzi discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza, w_f , ed il passo, p_f , delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni:
 - $50 \text{ mm} \leq w_f \leq 250 \text{ mm}$
 - $w_f \leq p_f \leq \min\{0.5 \cdot d, 3 \cdot w_f, w_f + 200 \text{ mm}\}$.

Confinamento

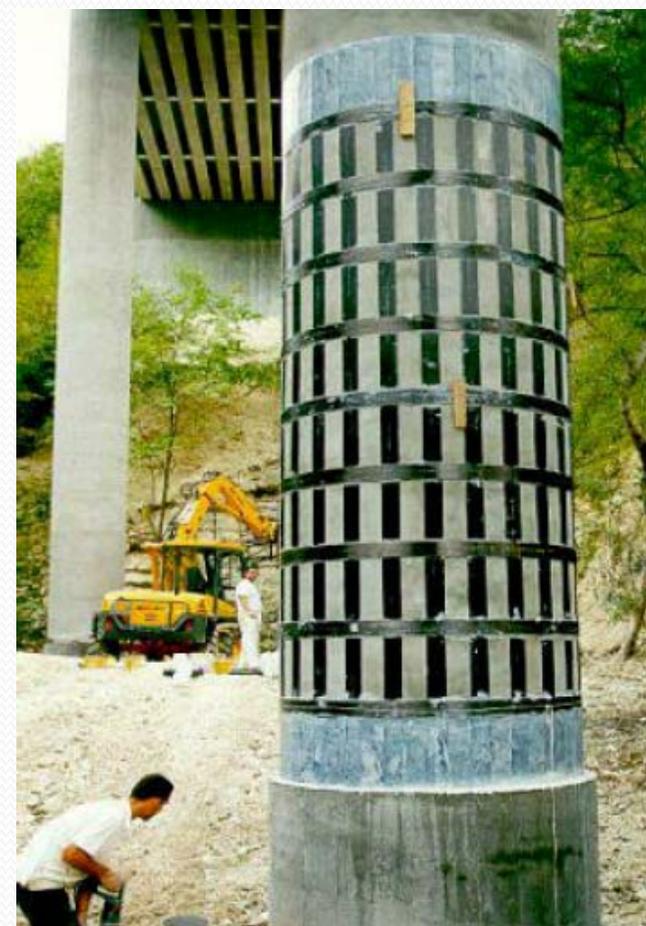
Generalità

- Un adeguato confinamento degli elementi di c.a. può determinare un miglioramento delle prestazioni dell'elemento strutturale, in termini di incremento:
 - della **resistenza ultima e la corrispondente deformazione ultima**, per elementi sollecitati da **sforzo normale centrato o con piccola eccentricità**;
 - della **duttilità** e, congiuntamente all'impiego di rinforzi longitudinali, la **resistenza ultima** per membrature pressoinflesse.
- L'incremento della resistenza a compressione e della corrispondente deformazione ultima del calcestruzzo confinato con FRP dipendono dalla **pressione di confinamento applicata**, funzione della **rigidezza del sistema** e della **forma della sezione trasversale** dell'elemento da confinare.

Confinamento

Generalità

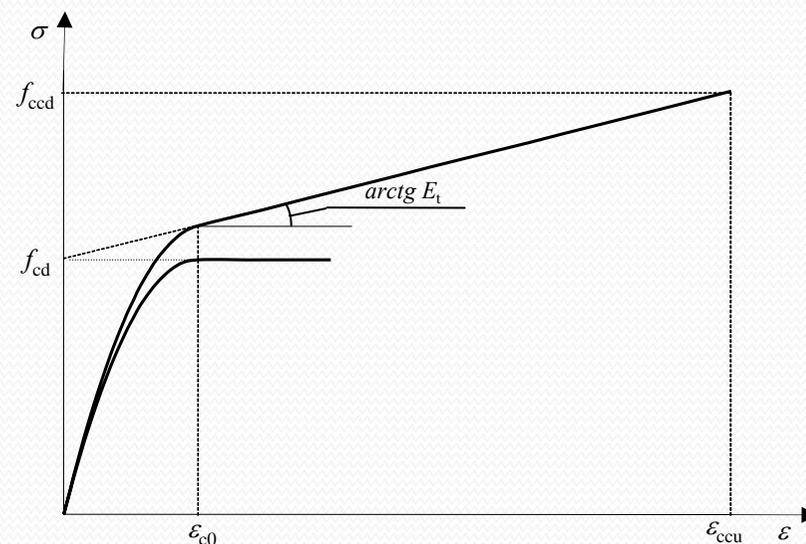
- Il confinamento di elementi di c.a. può essere realizzato con tessuti o lamine di FRP disposti sul contorno in modo da costituire una **fasciatura esterna continua** (ricoprimento) o **discontinua** (cerchiatura).



Confinamento

Generalità

- Un sistema confinante a base di FRP (elastico fino a rottura), a differenza di un sistema di acciaio (elasto-plastico), esercita una **pressione laterale sempre crescente**, in senso stretto, all'aumentare della dilatazione trasversale dell'elemento confinato.
- Legame tensione-deformazione “ σ - ε ” relativo a prove di compressione condotte su provini confinati con FRP



Confinamento

Resistenza di progetto a compressione centrata o con piccola eccentricità dell'elemento confinato

- Per ottenere un efficace confinamento è buona norma disporre le fibre in direzione perpendicolare all'asse dell'elemento. Nel caso di disposizione ad elica, l'efficacia del confinamento va opportunamente ridotta.
- In assenza di una **pretensione iniziale**, il rinforzo di 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 più vistosa dilatazione trasversale esibita da quest'ultimo.
- In maniera esplicita, si rileva che prima della fessurazione del calcestruzzo il sistema a base di FRP è praticamente scarico.
- La verifica dell'elemento confinato consiste nell'accertare che sia soddisfatta la seguente limitazione:

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

essendo $N_{Rcc,d}$ il valore di progetto della resistenza dell'elemento confinato.

Confinamento

Resistenza di progetto a compressione centrata o con piccola eccentricità dell'elemento confinato

- Valore di progetto della resistenza dell'elemento confinato

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

in cui: $\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} = 1 + 2.6 \cdot \left(\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}} \right)^{2/3}$ $f_{l,eff} = k_{eff} \cdot f_1$ $f_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid}$

ρ_f è la **percentuale geometrica di rinforzo**, dipendente dalla forma della sezione (circolare o rettangolare) e dalla modalità di applicazione del confinamento lungo l'elemento (fasciatura continua o discontinua)

k_{eff} è un **coefficiente di efficienza** (≤ 1), definibile come il 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).

Confinamento

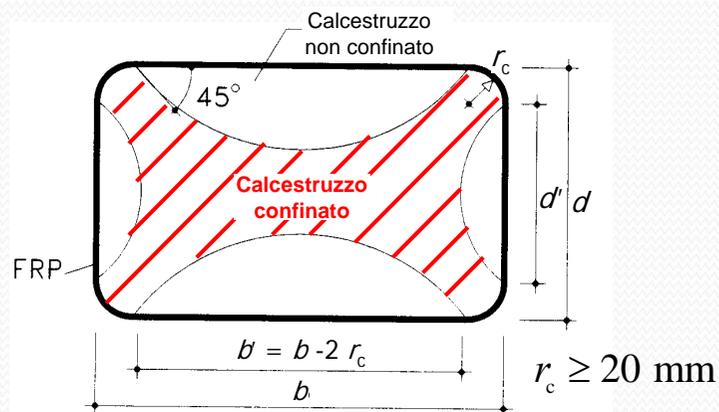
Resistenza di progetto a compressione centrata o con piccola eccentricità dell'elemento confinato

- Coefficiente di efficienza

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

Sezione rettangolare

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



In assenza di adeguate prove sperimentali, che ne comprovino l'efficacia, **non va considerato l'effetto del confinamento** su sezioni rettangolari per le quali $b/h > 2$, ovvero $\max\{b, h\} > 900\text{mm}$

Sezione circolare

$$k_H = 1$$

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

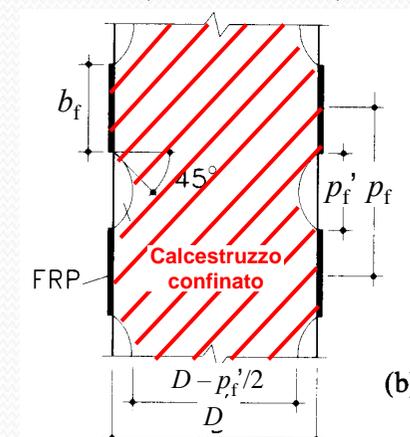
α_f inclinazione delle fibre rispetto alla sezione trasversale dell'elemento

Fasciatura continua

$$k_V = 1$$

Fasciatura discontinua

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



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

Nel caso di fasciatura discontinua è opportuno che la distanza netta fra le strisce rispetti la limitazione $p'_f \leq d_{\text{min}}/2$.

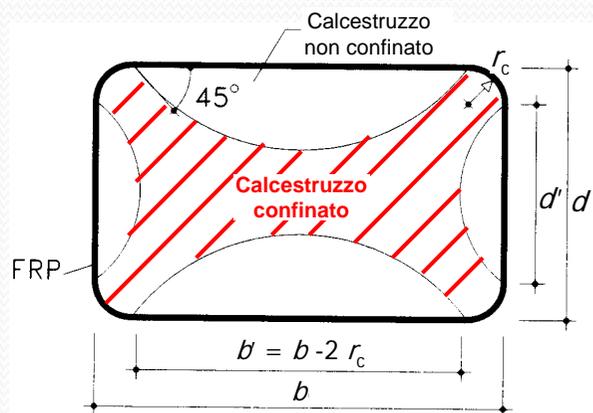
Confinamento

Resistenza di progetto a compressione centrata o con piccola eccentricità dell'elemento confinato

- Percentuale geometrica di rinforzo

Sezione rettangolare

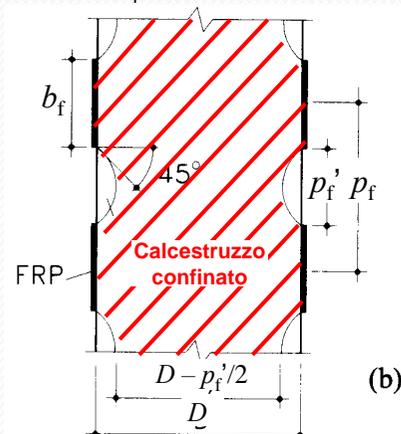
$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot (b + h) \cdot b_f}{b \cdot h \cdot p_f}$$



Nel caso di **fasciatura continua** l'espressione di ρ_f fornita nella diviene $2 \cdot t_f \cdot (b + h) / (b \cdot h)$

Sezione circolare

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



Nel caso di **fasciatura continua** l'espressione della percentuale ρ_f si specializza in $4 \cdot t_f / D$

Confinamento

Resistenza di progetto a compressione centrata o con piccola eccentricità dell'elemento confinato

- Deformazione ridotta di calcolo del composito fibrorinforzato

$$\varepsilon_{fd,rid} = \min\{\eta_a \cdot \varepsilon_{fk} / \gamma_f; 4\text{‰}\}$$

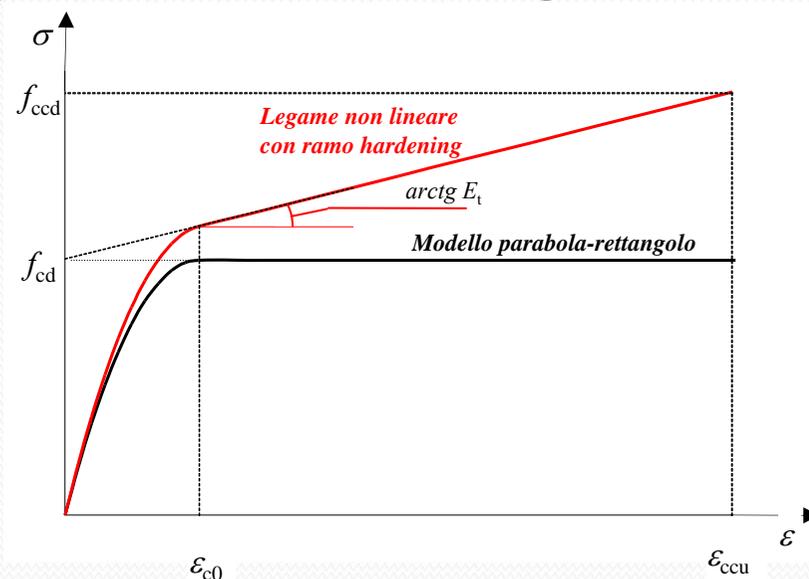
Modalità di collasso	Applicazione tipo A ⁽¹⁾	Applicazione tipo B ⁽²⁾
Rottura γ_f	1.10	1.25
Delaminazione $\gamma_{f,d}$	1.20	1.50

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

Confinamento

Duttilità di elementi presso-inflessi confinati con FRP

- Il confinamento con FRP può essere realizzato anche su elementi di calcestruzzo soggetti a pressoflessione; in tal modo è possibile incrementare la **loro duttilità** e, solo in misura ridotta, la loro resistenza.
- In mancanza di determinazioni più accurate, la valutazione della curvatura ultima di una sezione pressoinflessa può essere perseguita ipotizzando un classico legame costitutivo del tipo **parabola-rettangolo**
- In alternativa può essere adottato il legame costitutivo **non lineare con ramo hardening**.



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

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

Esempi di intervento



Università degli Studi di Salerno, Salerno (Italy)

Esempi di intervento



Roma: Palazzo della Corte dei conti

Interventi in zona sismica

Principi generali di intervento

- In zona sismica è possibile rinforzare con FRP strutture di conglomerato cementizio armato che non soddisfino i requisiti di sicurezza nei confronti dell'azione sismica di progetto relativamente ad uno o più stati limite.
- Tipologia, entità ed urgenza dell'intervento con FRP devono dipendere dall'esito di una preventiva valutazione della sicurezza sismica, tenendo conto in particolare che:
 - errori grossolani vanno eliminati;
 - forti irregolarità degli edifici (in termini di resistenza e/o rigidità) non possono essere sanate con tale tecnica;
 - risultano sempre opportuni interventi volti a migliorare la duttilità locale;
 - l'introduzione di rinforzi locali non deve ridurre la duttilità globale della struttura.

Interventi in zona sismica

Principi generali di intervento

- L'intervento con FRP è classificabile come:
 - rinforzo o ricostruzione totale o parziale degli elementi (interventi selettivi).
- La progettazione di un intervento con FRP deve comprendere le seguenti attività:
 - scelta motivata del tipo di intervento;
 - scelta delle tecniche e/o dei materiali;
 - dimensionamento preliminare dei rinforzi;
 - analisi strutturale che tenga conto delle caratteristiche della struttura post-intervento.

Interventi in zona sismica

Principi generali di intervento

- In zona sismica il rinforzo con FRP di elementi di c.a. è finalizzato principalmente al conseguimento degli obiettivi di seguito elencati:
 - incrementare **la resistenza a flessione semplice o a pressoflessione**;
 - incrementare **la resistenza a taglio**;
 - incrementare **la duttilità delle sezioni terminali** di travi e/o pilastri mediante fasciatura con FRP a fibre continue disposte lungo il perimetro;
 - migliorare **l'efficienza delle giunzioni per sovrapposizione**, mediante fasciatura con FRP a fibre continue disposte lungo il perimetro;
 - impedire **lo svergolamento delle barre longitudinali** soggette a compressione mediante fasciatura con FRP a fibre continue disposte lungo il perimetro;
 - incrementare **la resistenza a trazione** dei pannelli dei nodi trave-pilastro mediante applicazione di fasce di FRP con le fibre disposte secondo le isostatiche di trazione.

Interventi in zona sismica

Strategie di intervento

- In quanto selettiva, la strategia di intervento con FRP deve essere ispirata ai seguenti principi:
 - eliminazione di tutti i meccanismi di **collasso di tipo fragile**;
 - eliminazione di tutti i meccanismi di **collasso di piano** (“piano soffice”);
 - miglioramento della **capacità deformativa globale** della struttura conseguibile in uno dei seguenti modi:
 - **incrementando la capacità rotazionale delle potenziali cerniere plastiche** senza variarne la posizione;
 - **rilocalizzando le potenziali cerniere plastiche** nel rispetto del criterio della gerarchia delle resistenze.

Interventi in zona sismica

Eliminazione di tutti i meccanismi di collasso di tipo fragile

I meccanismi di collasso di tipo fragile da eliminare e le rispettive modalità di intervento sono:

- crisi per **taglio**: si interviene rinforzando a taglio gli elementi che presentano tale problema;
- crisi per **perdita di aderenza** nelle zone di sovrapposizione: si interviene confinando mediante avvolgimento di FRP le zone in cui la lunghezza di sovrapposizione delle barre longitudinali risulti insufficiente;
- crisi per **svergolamento delle barre longitudinali in compressione**: si interviene confinando mediante avvolgimento di FRP le zone di potenziale formazione di cerniere plastiche nelle quali le armature trasversali non siano in grado di impedire lo svergolamento post-elastico delle barre longitudinali compresse;
- crisi per **trazione dei pannelli dei nodi**: si interviene applicando su di essi un rinforzo di FRP.

Interventi in zona sismica

Eliminazione dei meccanismi di collasso di piano

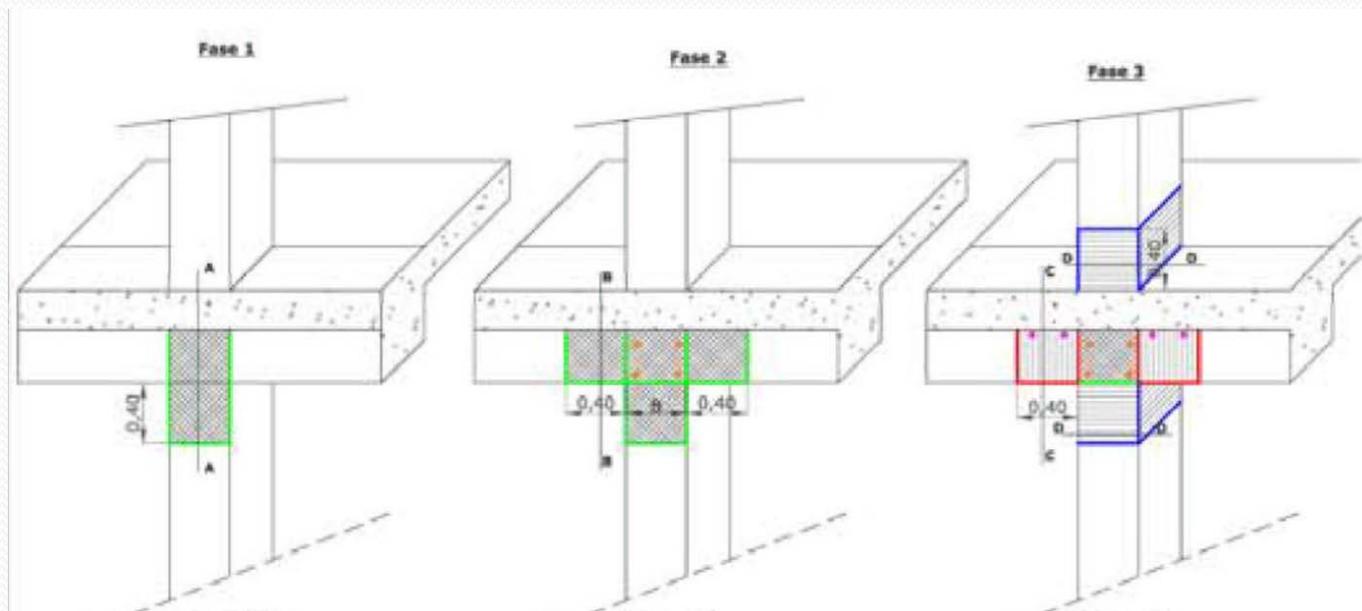
- In assenza di pareti, i meccanismi di collasso di piano possono attivarsi a seguito della **formazione di cerniere plastiche sia in testa che al piede di tutti i pilastri** di quel piano.
- L'intervento sarà finalizzato ad **incrementare in tali zone la resistenza a flessione composta**, con l'obiettivo di inibire la formazione delle suddette cerniere.

Interventi in zona sismica

Incremento della capacità deformativa globale di una struttura

- La capacità deformativa ultima di una struttura è una misura della sua attitudine a sopportare l'azione sismica.
- La capacità deformativa ultima di una struttura può essere saggiata utilizzando i **risultati di un'analisi statica non lineare**.
- La capacità deformativa ultima di una struttura dipende dalla **capacità deformativa in campo plastico dei singoli elementi resistenti** (travi, pilastri e pareti), misurata attraverso la rotazione ultima rispetto alla corda.

Esempi di intervento



Cento (Ferrara)

Esempi di intervento



Hotel Bellerive, Salò (Italy)

presenta

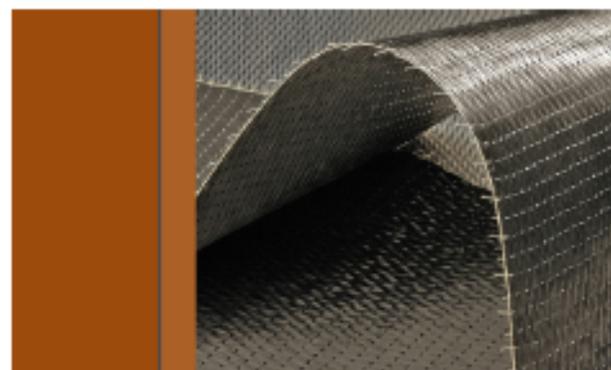
Riabilitazione strutturale con materiali compositi fibrorinforzati

di Luigi Ascione e Antonella Giordano

Il volume è una rassegna dei principali tipi di interventi riabilitativi di strutture di c.a. mediante materiali compositi fibrorinforzati. Il progetto e le verifiche sono eseguite in accordo con le recenti Norme Tecniche per le costruzioni (DM del 14/01/2008) e con le Istruzioni CNR n. 200 del 2004.

L'esposizione è svolta avvalendosi di due esempi di strutture intelaiate che necessitano di rinforzo strutturale a seguito di un ipotizzato cambio di destinazione d'uso.

Il volume comprende, infine, un capitolo conclusivo dedicato alle principali proprietà fisiche e meccaniche dei materiali compositi, al fine di indirizzare gli utilizzatori verso una scelta ragionata tra le molteplici soluzioni offerte dal mercato.

Luigi Ascione
Antonella Giordano

Riabilitazione strutturale con materiali compositi fibrorinforzati

Interventi su edifici di conglomerato cementizio armato