

INTERVENTI LOCALI MEDIANTE COMPOSITI PER IL RINFORZO DI ELEMENTI IN C.A.

Prof. Ing. Flora Faleschini

RIFERIMENTI NORMATIVI

C8.7.4.2.3 Placcatura e fasciatura in materiali compositi

L'uso di idonei materiali compositi (o altri materiali resistenti a trazione) nel rinforzo sismico di elementi in c.a. è finalizzato agli obiettivi seguenti:

- aumento della resistenza a taglio di pilastri, travi, nodi trave-pilastro e pareti mediante applicazione di fasce con 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 (purché si garantisca l'efficacia dell'ancoraggio nel tempo);
- aumento della duttilità nelle parti terminali di travi e pilastri mediante fasciatura con fibre continue disposte lungo il

Ai fini delle verifiche di sicurezza degli elementi rafforzati con FRP/FRCM si possono adottare le Istruzioni CNR-DT 200 R1/2013 + Istruzioni CNR-DT 215/2018/2018

RIFERIMENTI NORMATIVI

CNR – Commissione di Studio per la Predisposizione e l'Analisi di Norme Tecniche relative alle costruzioni

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

COMMISSIONE DI STUDIO PER LA PREDISPOSIZIONE E L'ANALISI
DI NORME TECNICHE RELATIVE ALLE COSTRUZIONI

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

Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie



CNR-DT 200 R3/2013

ROMA – CNR 10 ottobre 2013

CNR – Commissione di studio per la predisposizione e l'analisi di norme tecniche relative alle costruzioni

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

COMMISSIONE DI STUDIO PER LA PREDISPOSIZIONE E L'ANALISI
DI NORME TECNICHE RELATIVE ALLE COSTRUZIONI

**Istruzioni
per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo
di Interventi di Consolidamento Statico
mediante l'utilizzo di
Compositi Fibrorinforzati a Matrice Inorganica**



CNR-DT 215/2018

ROMA – CNR 06.02.2019

APPLICAZIONI - FLESSIONE



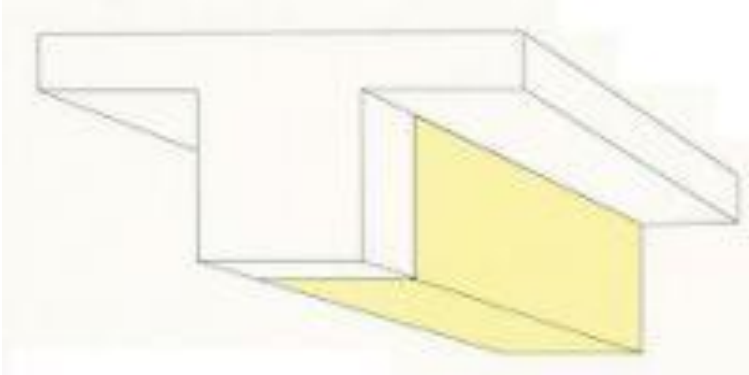
Rinforzo di **traversi** di impalcati da ponte

RINFORZO A **FLESSIONE** (fibre disposte longitudinalmente)



Rinforzo di **soletta** e **travi principali** di impalcati da ponte

APPLICAZIONI - TAGLIO



RINFORZO A **TAGLIO** DI TRAVI
(fibre disposte secondo la direzione delle staffe)



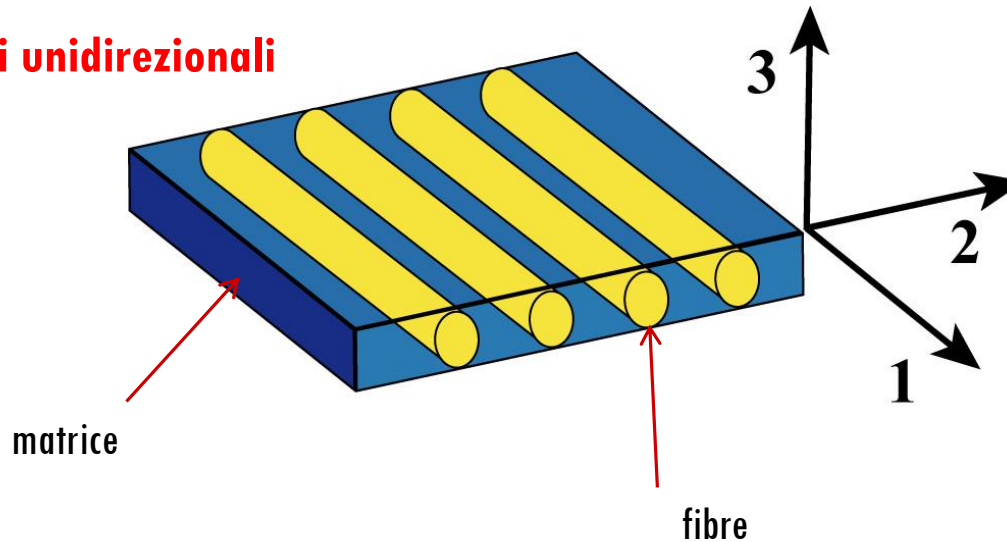
APPLICAZIONI - CONFINAMENTO



CONFINAMENTO
DI PILE O PILASTRI
(fibre disposte lungo il perimetro)

CARATTERISTICHE MECCANICHE

Compositi unidirezionali

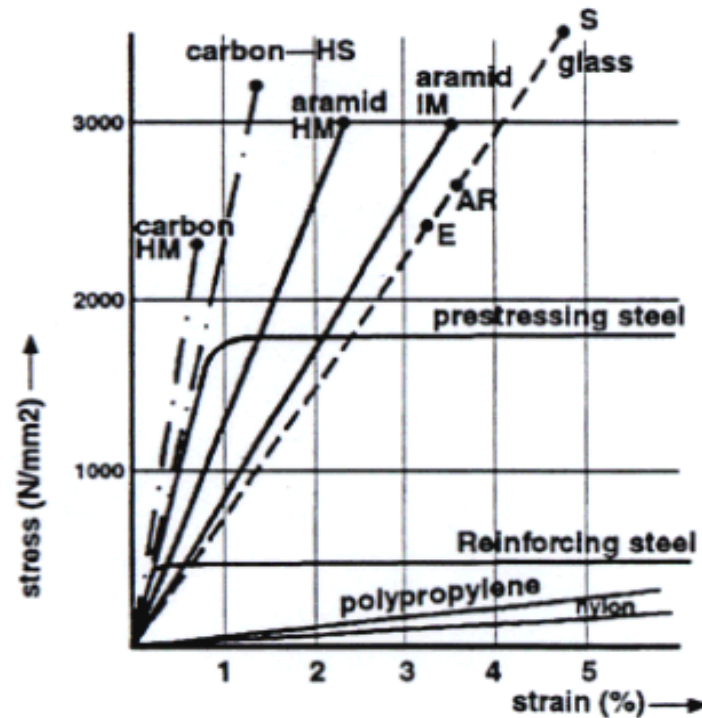


Pre-cured systems	Modulus of elasticity [GPa]		Ultimate strength [MPa]		Ultimate strain [%]	
	FRP E_f	Fiber E_{fib}	FRP f_f	Fiber f_{fib}	FRP ε_{fu}	Fiber $\varepsilon_{fib,u}$
CFRP (low modulus)	160	210-230	2800	3500-4800	1.6	1.4-2.0
CFRP (high modulus)	300	350-500	1500	2500-3100	0.5	0.4-0.9

CARATTERISTICHE MECCANICHE

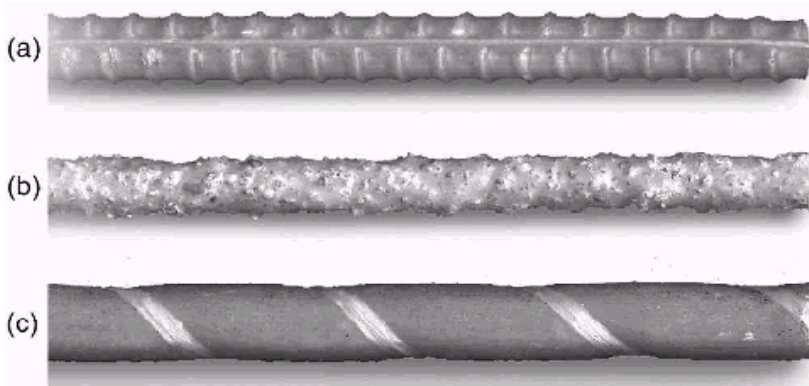
Diagramma tensione-deformazione per alcuni tipi di fibre esistenti in commercio

- fibre di carbonio
- fibre di vetro
- fibre di aramide
- fibre di polipropilene
- fibre di basalto
- ecc.



confronto con acciaio per armatura ordinaria e con acciaio da precompressione

BARRE IN COMPOSITO



Trattamento superficiale delle barre in FRP

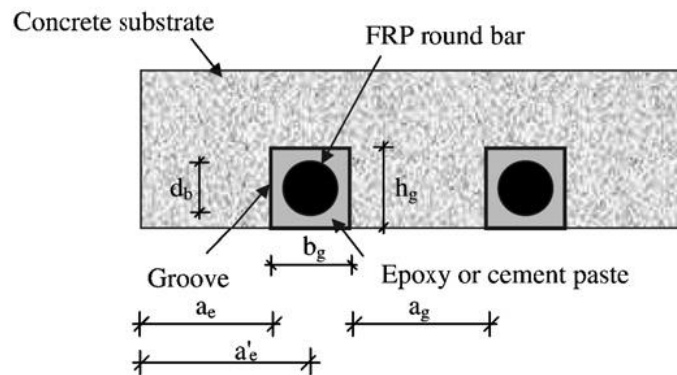
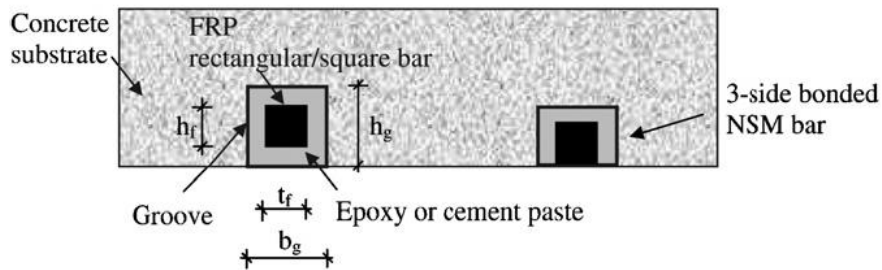
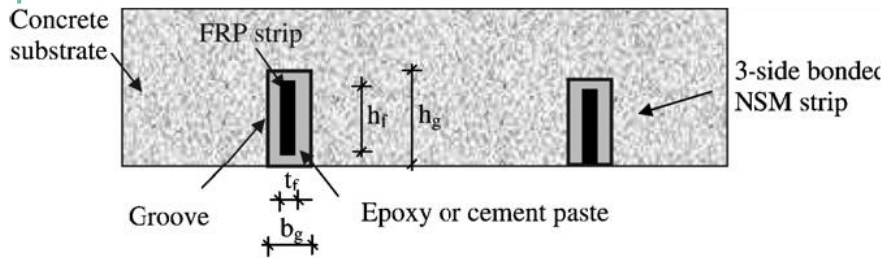


Rottura di barre in CFRP (fibre di carbonio)



Rottura di barre in GFRP (fibre di vetro)

TECNICA “NEAR SURFACE MOUNTED”



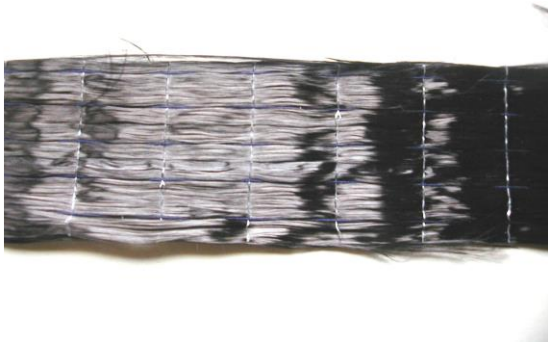
Carenza di indicazioni normative/linee guida/raccomandazioni



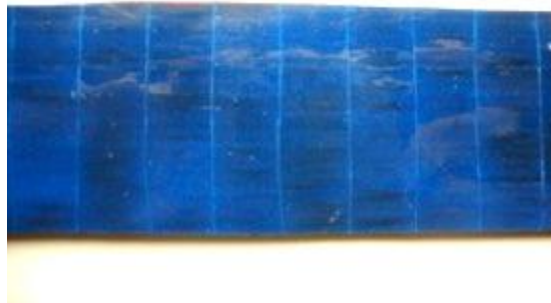
TESSUTI E LAMINATI FRP

Disponibili nella forma di:

- fogli di fibra, da impregnare in situ con resine epossidiche
- laminati, pronti per l'incollaggio



Tessuto unidirezionale in fibra di carbonio



Tessuto impregnato in resina



Laminato

TESSUTI E LAMINATI FRP

Il materiale FRP per applicazioni strutturali può essere fornito in:

- rotoli di laminato
- rotoli di tessuto



Rotolo di laminato CFRP



Rotolo di tessuto CFRP



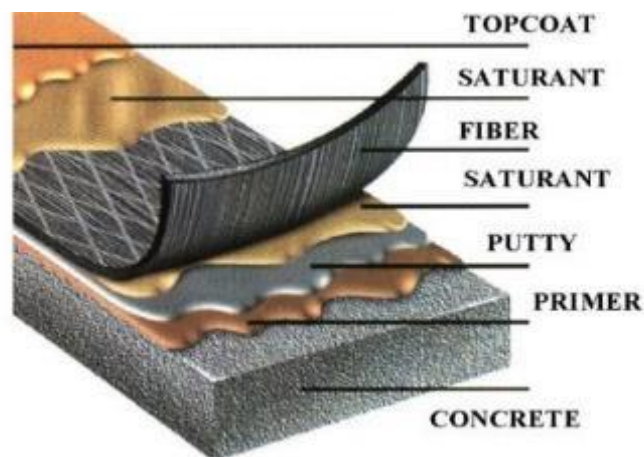
Tessuti unidirezionali in fibra di carbonio, aramide e vetro

IL SISTEMA DI RINFORZO “ESTERNO” CON TESSUTI FRP – EBR

Esiste una vasta gamma di sistemi di rinforzo che utilizzano una notevole varietà di componenti. Ogni casa produttrice propone usualmente una sua tipologia con determinate peculiarità.

Sistema di rinforzo tipo “wet lay up”

(impregnazione in situ delle fibre tramite la matrice polimerica) per l’adattabilità a qualsiasi forma dei tessuti, tale sistema è attualmente uno dei più utilizzati.



Componenti del sistema di rinforzo

Il primer vuole garantire il collegamento solidale del sistema di rinforzo al supporto. Prima di applicare il primer le superfici dell’elemento da trattare vengono solitamente preparate tramite sabbiatura.

La rasatura (Putty) ha la funzione di regolarizzare le superfici degli elementi da rinforzare. Usualmente la rasatura viene applicata entro 24 ore dall’applicazione del primer.

L’adesivo (Saturant) permette il trasferimento degli sforzi di trazione dal calcestruzzo alle fibre. E’ un prodotto bicomponente a base epossidica. Nel caso di applicazione di più strati di adesivo conviene attendere almeno 30 minuti.

La matrice è un sistema di resine avente la funzione principale di adesivo.

FASI DI APPLICAZIONE DEL SISTEMA DI RINFORZO “POST-IMPREGNATO”



Sabbiatura della superficie di applicazione del rinforzo

Applicazione del primer



FASI DI APPLICAZIONE DEL SISTEMA DI RINFORZO “POST-IMPREGNATO”



Operazione di rasatura della superficie



Applicazione dell'adesivo



FASI DI APPLICAZIONE DEL SISTEMA DI RINFORZO “POST-IMPREGNATO”

Impregnazione del foglio mediante rullino metallico



Applicazione dei fogli di fibre

FASI DI APPLICAZIONE DEL SISTEMA DI RINFORZO CON LAMINATI



Preparazione della superficie



Applicazione della resina epossidica



Applicazione del laminato

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DEL RINFORZO IN FRP

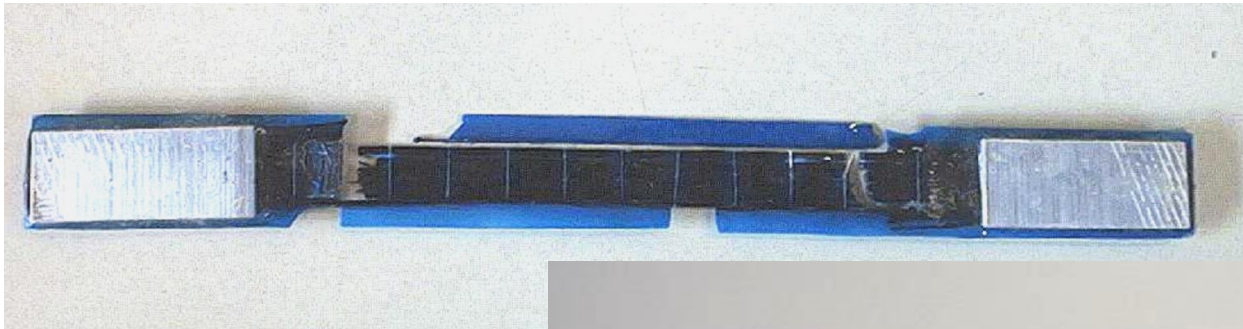
Sul mercato è presente una **grande quantità di prodotti** diversificati;

- **non ancora definita una standardizzazione** delle caratteristiche fisiche e meccaniche;
- **i controlli di qualità** applicati ai prodotti da parte delle aziende manifatturiere possono risultare inadatti a garantire i requisiti minimi necessari alle applicazioni in campo strutturale;
- **risulta opportuno affidarsi a certificazioni esterne prodotte da laboratori espressamente specializzati**, non solo per saggi da cantiere sui materiali impiegati o in fase di collaudo per il controllo dell'applicazione, ma anche per indagini preventive a supporto del progetto dell'intervento stesso.

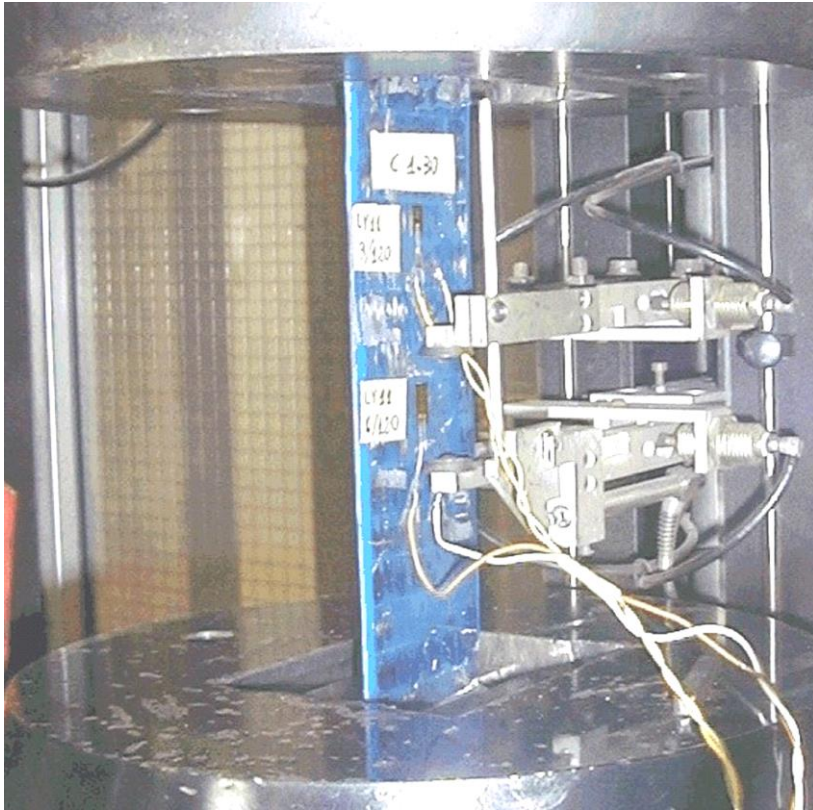
PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DEL RINFORZO IN FRP

Negli impieghi strutturali i materiali FRP sono sfruttati essenzialmente per assorbire **sforzi di trazione**, ed agire quindi **nella direzione in cui sono disposte le fibre**.

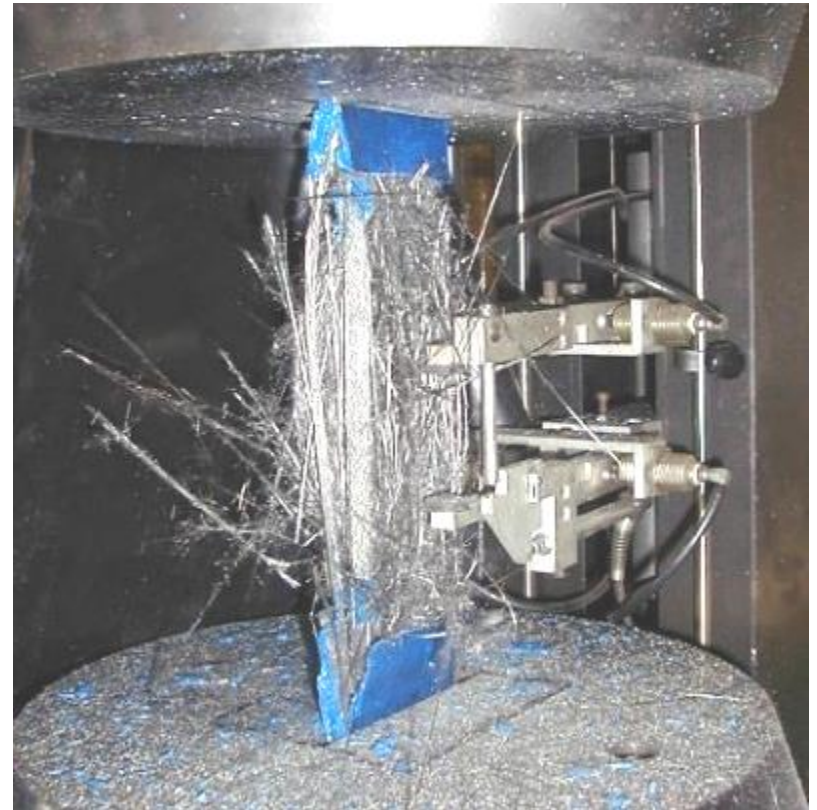
La normativa ASTM-D3039 fornisce i criteri di valutazione della bontà del test basati sul modo di rottura. Appare chiaro come **rotture localizzate vicino agli ancoraggi o disomogenee nella sezione trasversale rivelino la scelta di un'inadeguata metodologia di prova**.



PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DEL RINFORZO IN FRP

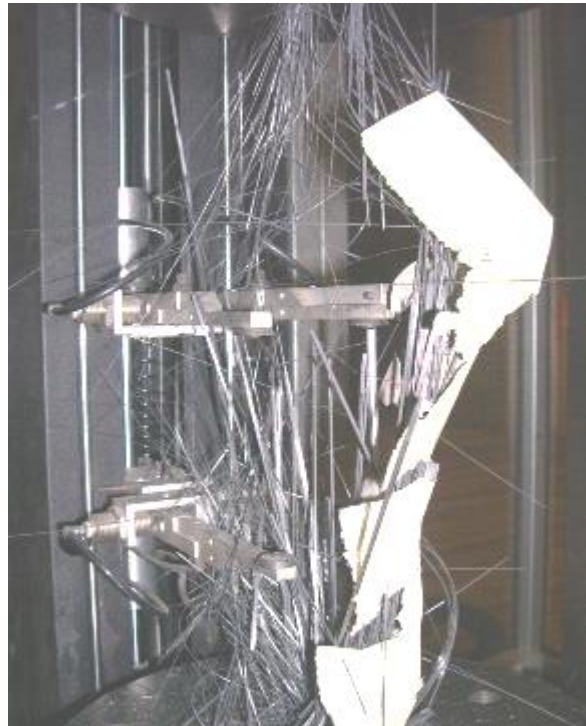


Setup di prova secondo ASTM D3039



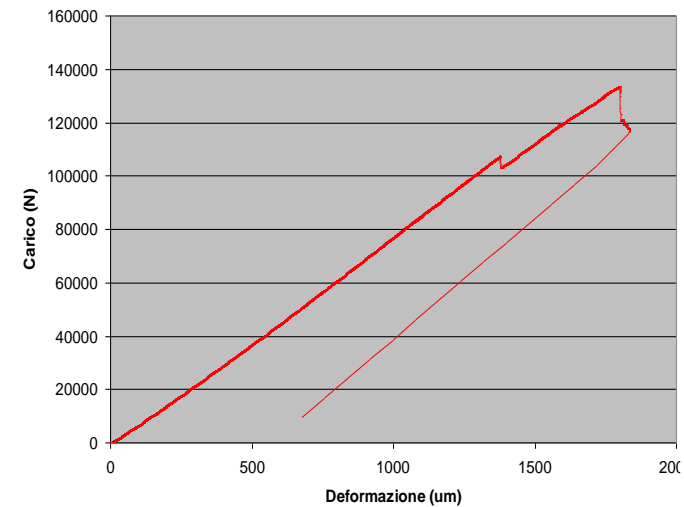
Tipo di rottura esplosivo di materiale CFRP

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DEL RINFORZO IN FRP



Campione di laminato prima e dopo la prova

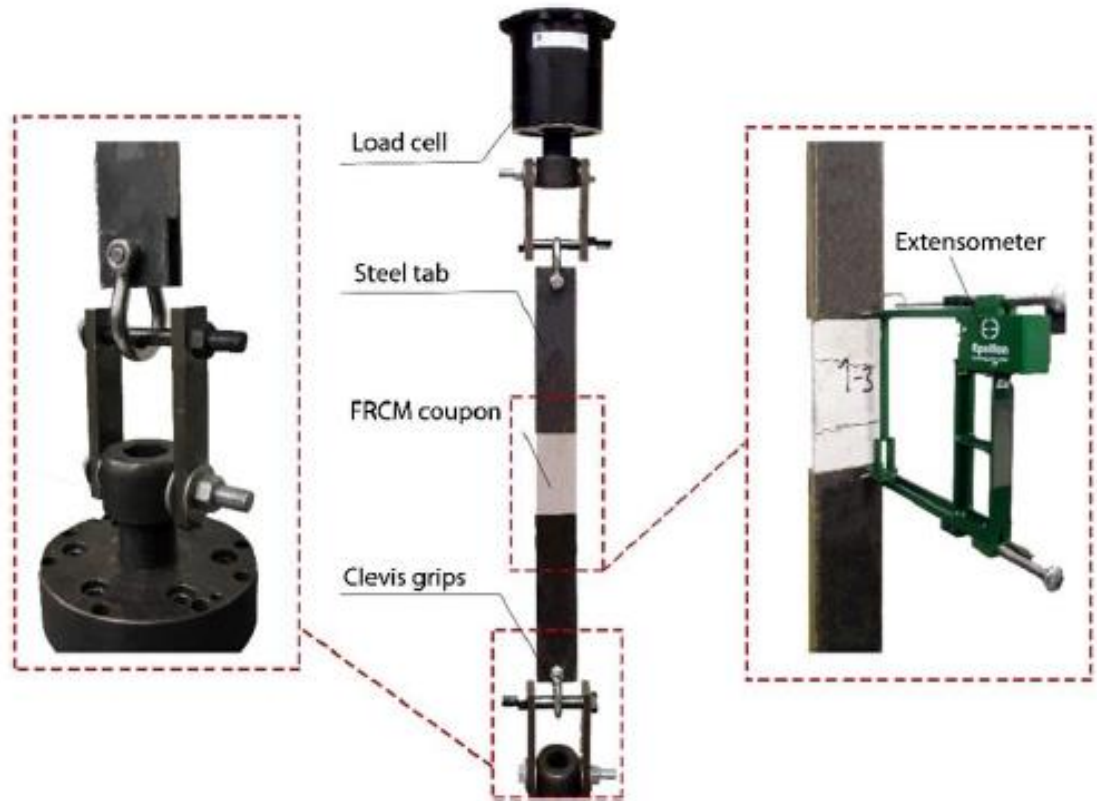
Diagramma carico-deformazione



PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DEL RINFORZO IN FRP/FRCM

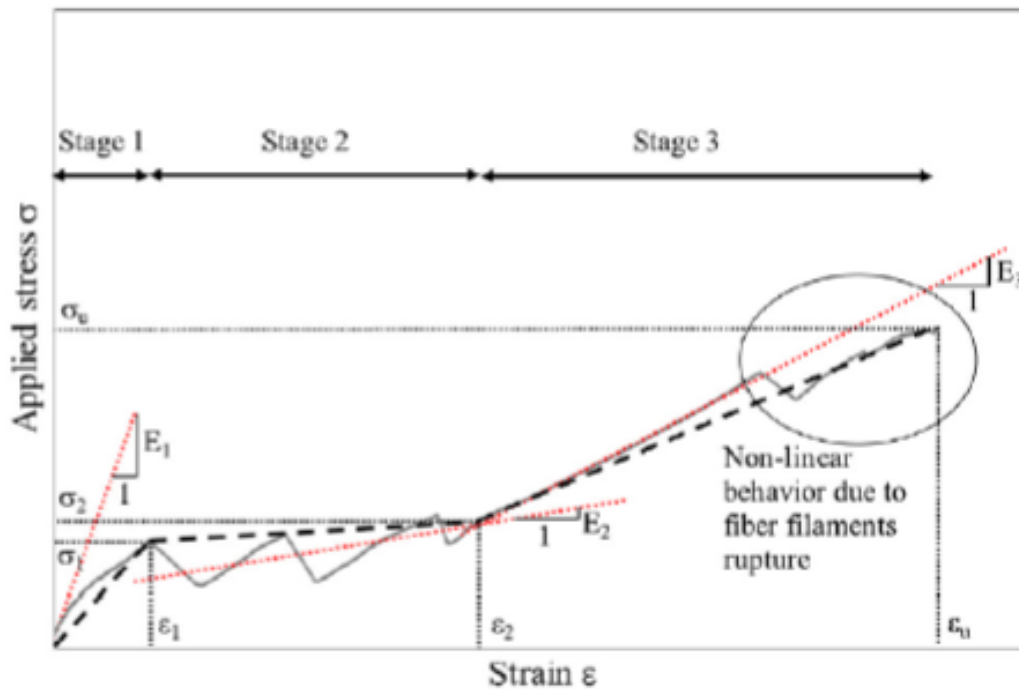


filo singolo



composito

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DEL RINFORZO IN FRCM



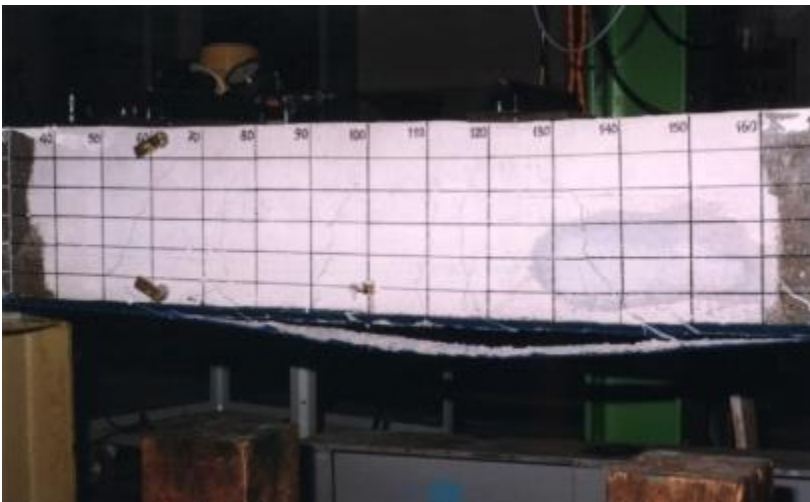
Stage 1. Malta non fessurata, contribuisce alla rigidezza e alla resistenza del composito.

Stage 2. Fessurazione della malta. Sviluppo di ampie deformazioni.

Stage 3. Non si aprono nuove fessure, la resistenza viene offerta dal composito. Incremento della rigidezza.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE - ADERENZA

Le sperimentazioni hanno evidenziati meccanismi di rottura fragili degli elementi rinforzati, dovuti essenzialmente alla **delaminazione (perdita di aderenza)**.

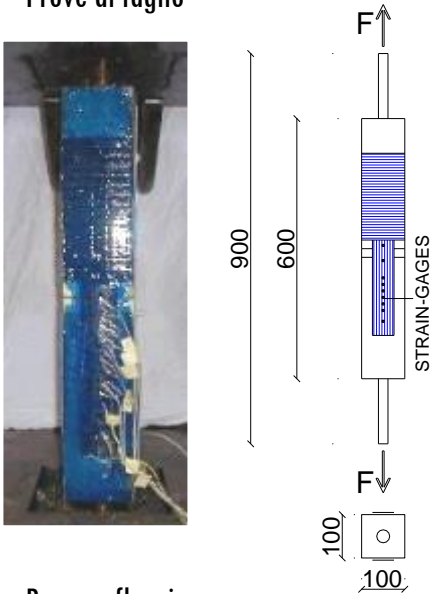


Sono in atto ricerche atte a identificare la lunghezza di aderenza effettiva e determinare il carico massimo sopportabile dall'elemento rinforzato in modo da garantirne un buon comportamento strutturale.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE - ADERENZA

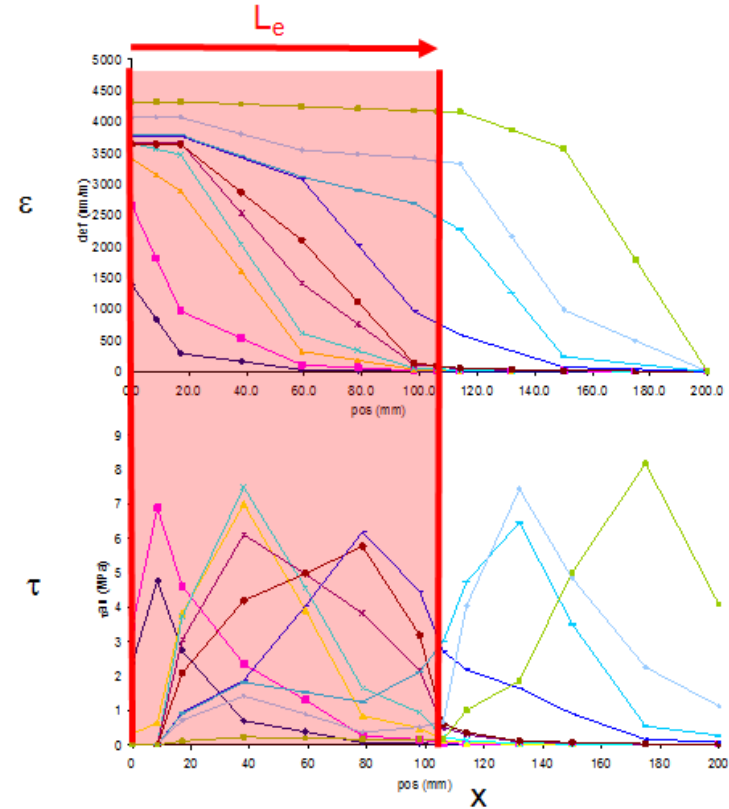
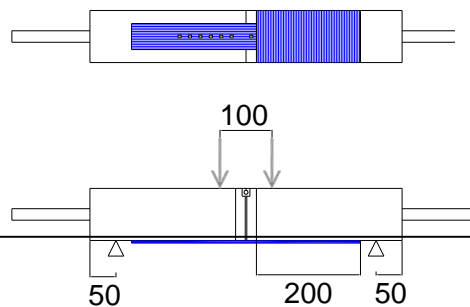
→ PROVE SPERIMENTALI

a) Prove di taglio



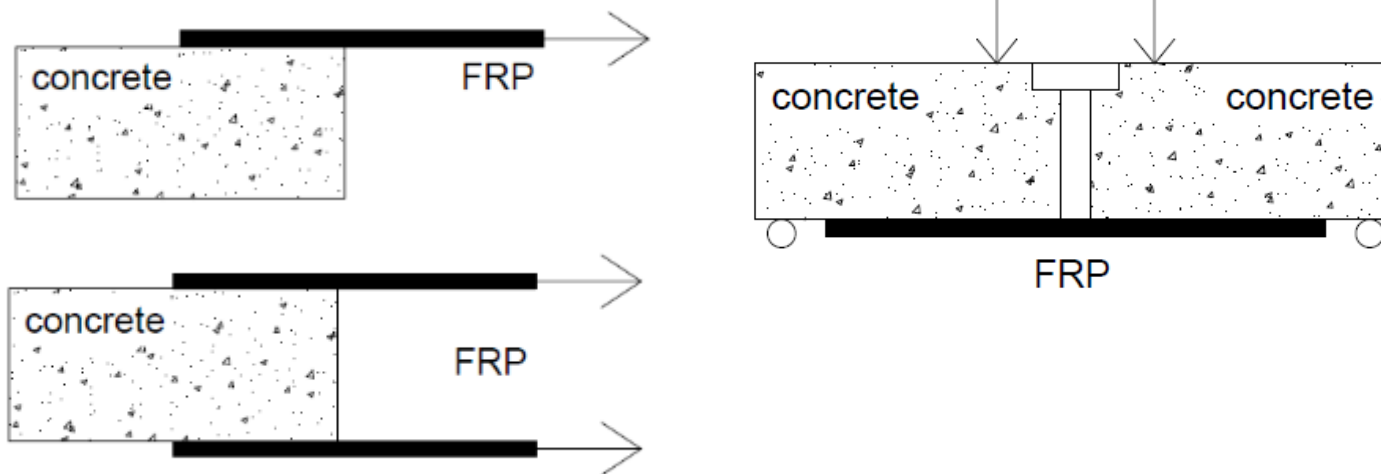
- Lunghezza effettiva di aderenza L_e ;
- Massimo carico sopportabile aderenza P_{max}

b) Prove a flessione



PROVE DI CARATTERIZZAZIONE - ADERENZA

- esistono varie metodologie di prova per la misura dell'adesione (**bond**) tra il composito FRP ed il substrato sul quale esso è applicato.
- **non esistono ancora prescrizioni normative precise**, ma le ricerche recenti si sono comunque rivolte verso alcuni tipi di test ritenuti più semplici o attendibili (è comunque necessaria una standardizzazione);



- **non esistono correlazioni certe** tra i risultati ottenuti con le diverse metodologie di prova;
- occorre accertarsi che i dati dichiarati dal produttore relativi all'adesione siano ottenuti con metodi attendibili.

FRP – CALCESTRUZZO: TIPI DI DELAMINAZIONE (CNR-DT 200)

La delaminazione può prodursi:

- **nel calcestruzzo;**
- **tra calcestruzzo e adesivo;**
- **all'interno dell'adesivo;**
- **nel rinforzo (ad esempio tra diversi strati).**

Nel caso di rinforzi posti correttamente in opera, **poichè la resistenza dell'adesivo è in genere più elevata di quella 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 in acciaio.



LUNGHEZZA DI ANCORAGGIO -CNR-DT 200/2013

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

- 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;
- $f_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fd}}{s_u}$, con $s_u = 0.25$ mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto (vedere Appendice C);
- $\gamma_{Rd} = 1.25$ è un coefficiente correttivo.

LUNGHEZZA DI ANCORAGGIO -CNR-DT 200/2013

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

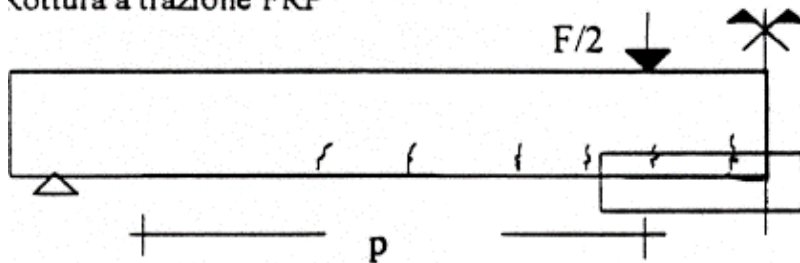
- f_{cm} e f_{ctm} sono, rispettivamente, i valori medi delle resistenze a compressione ed a trazione del calcestruzzo valutate *in situ*; in mancanza di dati sperimentali, la resistenza media a trazione del calcestruzzo può essere dedotta dalla f_{cm} in accordo con quanto indicato nella Normativa vigente;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

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f/b}{1 + b_f/b}} \geq 1, \quad (4.3)$$

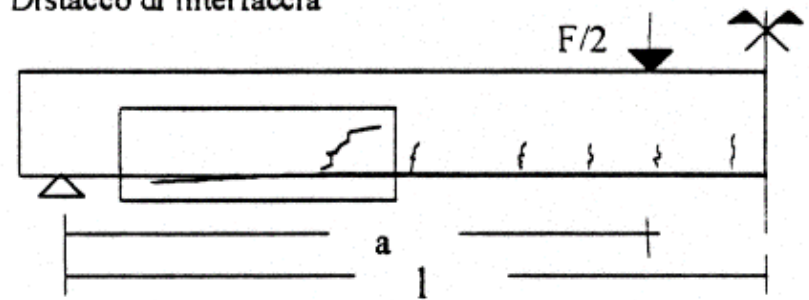
- sempreché risulti $b_f/b \geq 0.25$ (per $b_f/b < 0.25$ al coefficiente k_b viene attribuito il valore 1.18, corrispondente a $b_f/b = 0.25$);
- k_G è un ulteriore coefficiente correttivo tarato sulla base di risultati di prove sperimentali, da assumersi pari 0.023 mm per i compositi preformati ed a 0.037 mm per i compositi impregnati *in situ*.

RINFORZO A FLESSIONE-MECCANISMI DI ROTTURA

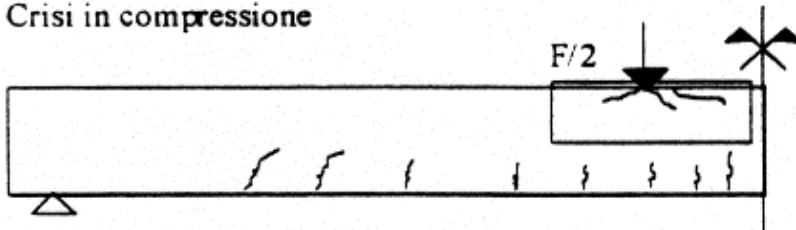
Rottura a trazione FRP



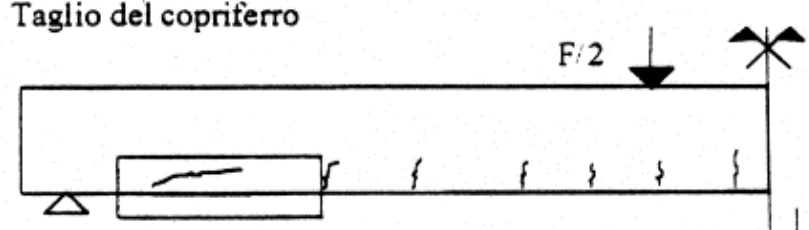
Distacco di interfaccia



Crisi in compressione



Taglio del copriferro



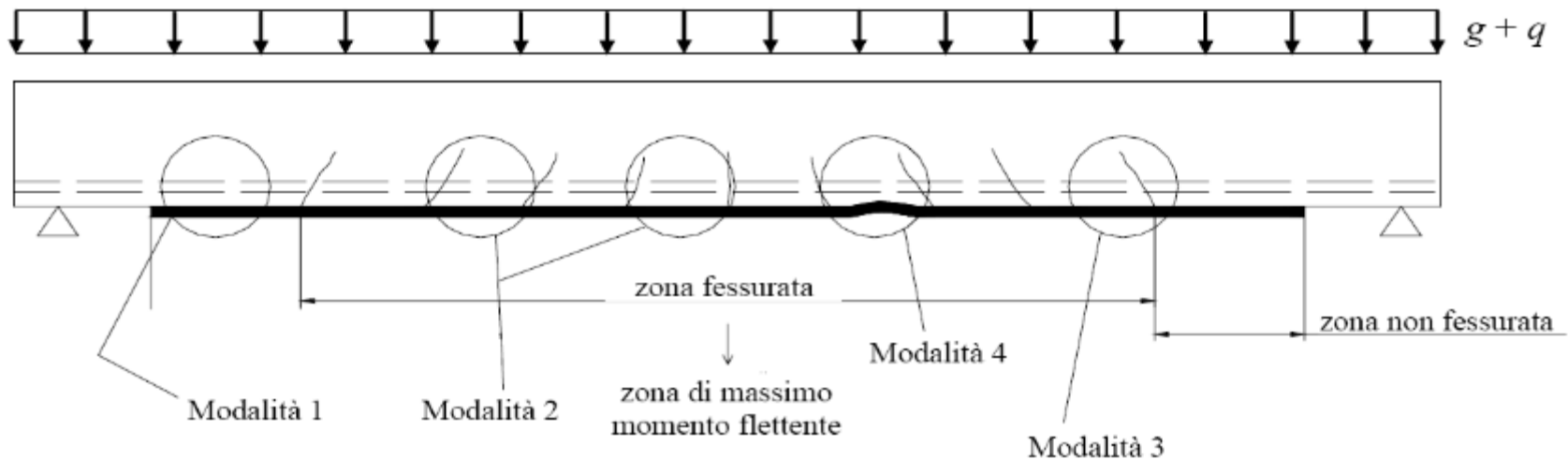
Il primo meccanismo è sinonimo del miglior utilizzo dei materiali e si manifesta con il superamento, da parte dell'acciaio di armatura, del limite di snervamento con un comportamento relativamente duttile.

Gli altri meccanismi sono **essenzialmente fragili e si manifestano in modo improvviso.**

RINFORZO A FLESSIONE-MECCANISMI DI ROTTURA

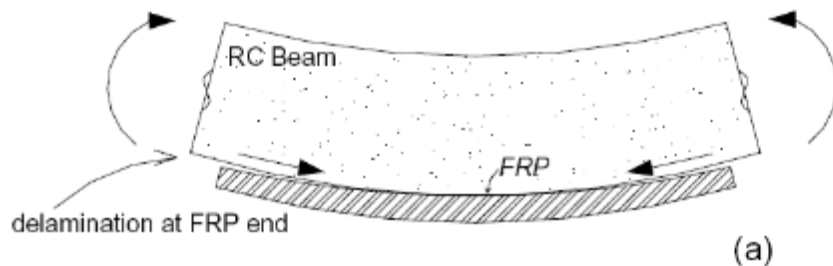
MODALITA' DI ROTTURA PER DELAMINAZIONE DI UNA TRAVE RINFORZATA A FLESSIONE (CNR-DT 200)

- Modalità 1: **distacco di estremità**
- Modalità 2: **distacco intermedio causato da fessure per flessione**
- Modalità 3: **distacco causato da fessure diagonali da taglio**
- Modalità 4: **distacco causato da irregolarità della superficie di cls**

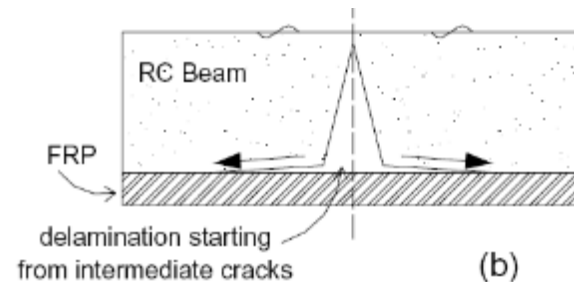


RINFORZO A FLESSIONE-MECCANISMI DI ROTTURA

MODALITA' DI ROTTURA PER DELAMINAZIONE DI UNA TRAVE RINFORZATA A FLESSIONE (CNR-DT 200)



Modalità 1: distacco di estremità



Modalità 2: distacco intermedio causato da fessure per flessione

RINFORZO A FLESSIONE-CALCOLO CAPACITA' 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:

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

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 teso snervato allo SLU**) le regole riportate nel documento CNR-DT 200 si riferiscono esclusivamente a tale situazione.

RINFORZO A FLESSIONE-CALCOLO CAPACITA' RESISTENTE A FLESSIONE

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:

- per **cedimento del calcestruzzo a compressione;**
- per **cedimento del rinforzo a trazione o per delaminazione.**

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd} \right\} \quad \text{DEFORMAZIONE MASSIMA NEL RINFORZO}$$

ε_{fk} è la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo,

ε_{fdd} è la deformazione massima per distacco intermedio,

$\gamma_f = 1.10$ per rottura del rinforzo

$\gamma_f = \gamma_{fd} = 1.20$ per distacco intermedio

η_a definito nella Tabella accanto.

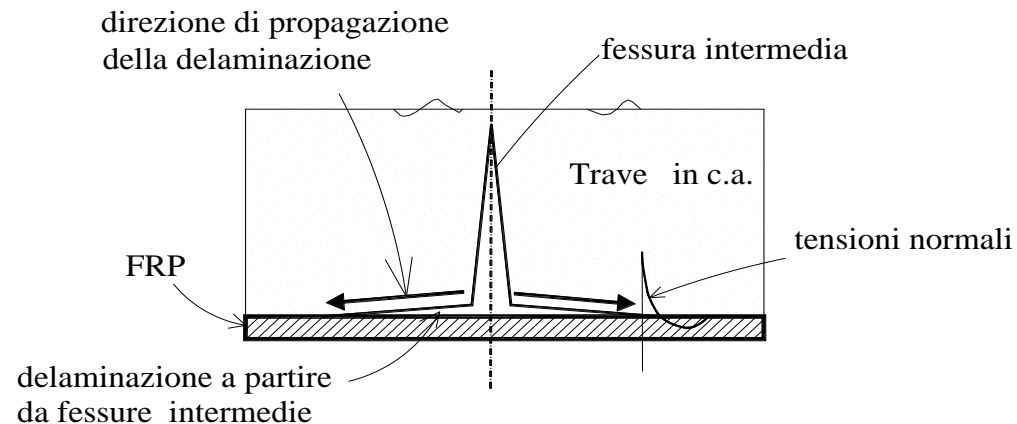
Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica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

RINFORZO A FLESSIONE-CALCOLO CAPACITA' RESISTENTE A FLESSIONE

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd} \right\} \quad \begin{array}{l} \gamma_f = 1.10 \\ \gamma_{f,d} = 1.20 \end{array}$$

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f}$$

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



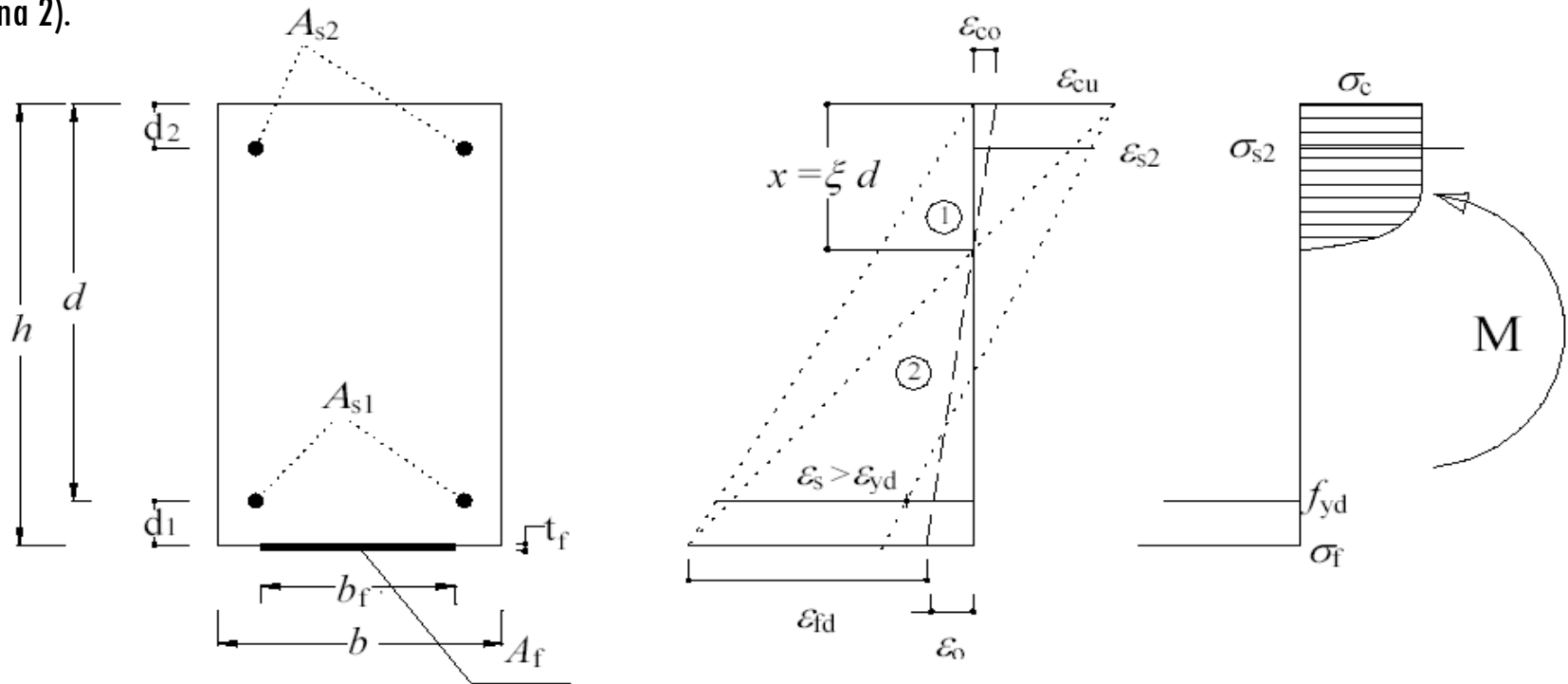
nella quale alcuni simboli sono stati già introdotti in precedenza;

$k_{G,2}$ è un coefficiente correttivo calibrato sulla base di risultati di prove sperimentali, da assumersi pari a 0.10 mm indipendentemente dal tipo del rinforzo;

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-CALCOLO CAPACITA' RESISTENTE A FLESSIONE

Con riferimento alla situazione esemplificativa rappresentata in Figura, 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-CALCOLO CAPACITA' RESISTENTE A FLESSIONE

Nella zona I la rottura si verifica 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} .
Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, possono essere calcolate, tramite la linearità del diagramma, attraverso le seguenti relazioni:

- (FRP)

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

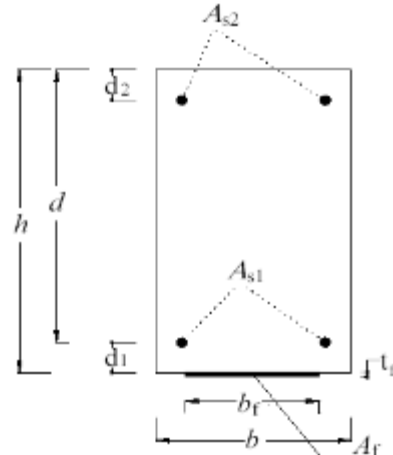
- (acciaio compresso)

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

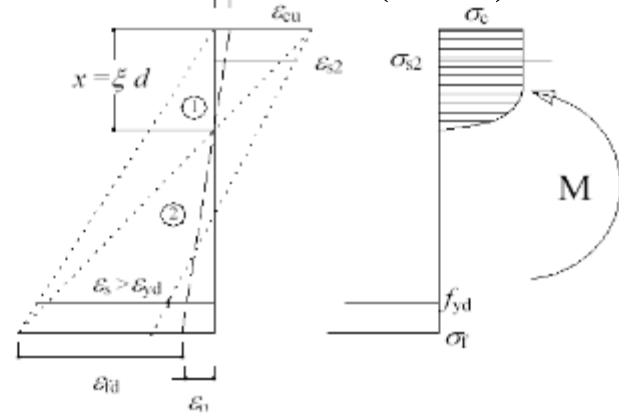
- (acciaio teso)

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

- (calcestruzzo compresso)



$$\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_o) \cdot \frac{x}{(h - x)} \leq \epsilon_{cu}$$



Poiché 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-CALCOLO CAPACITA' RESISTENTE A FLESSIONE

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:

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

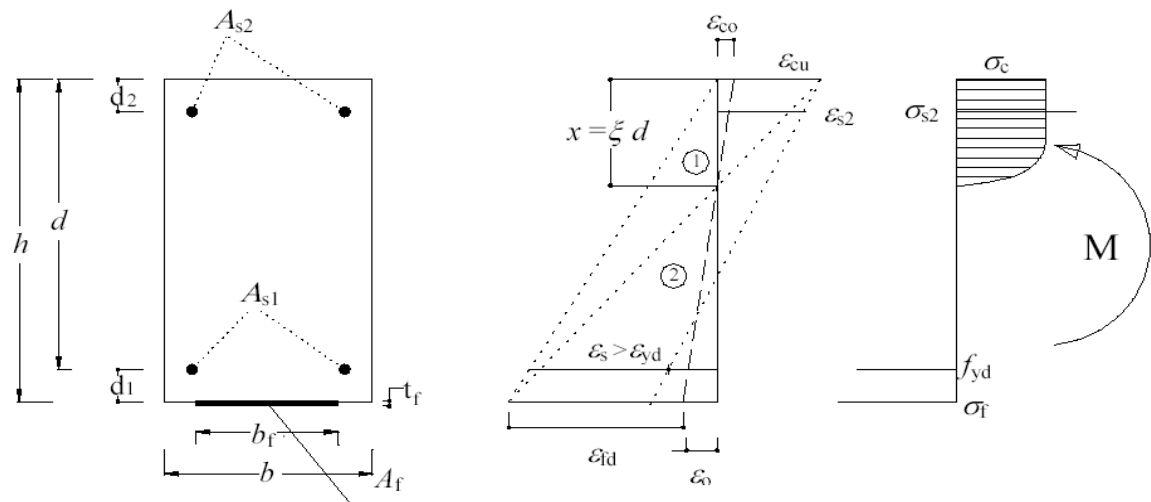
$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$

- (acciaio compresso)

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

- (acciaio teso)

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



RINFORZO A FLESSIONE-CALCOLO CAPACITA' RESISTENTE A FLESSIONE

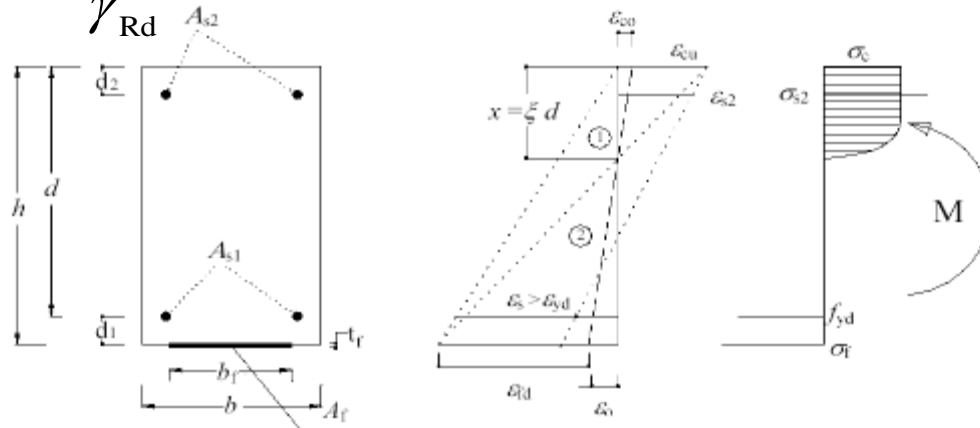
Le due equazioni da utilizzare per la risoluzione del problema sono derivanti da:

- equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave

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

- equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese e parallelo all'asse neutro (con $\gamma_{Rd} = 1$ e $\psi = 0.8$ e $\lambda = 0.4$ con il modello stress-block del calcestruzzo).

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



Zona (1): rottura fibra

Zona (2): rottura cls

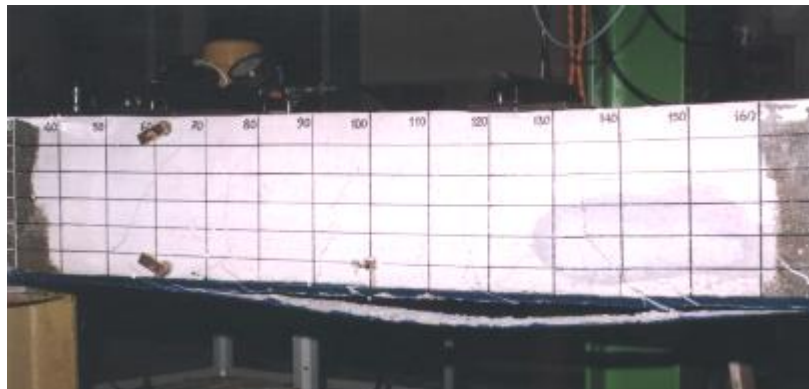
RINFORZO A FLESSIONE-SPERIMENTAZIONE



Rottura del rinforzo



Rottura del rinforzo



Distacco intermedio del rinforzo

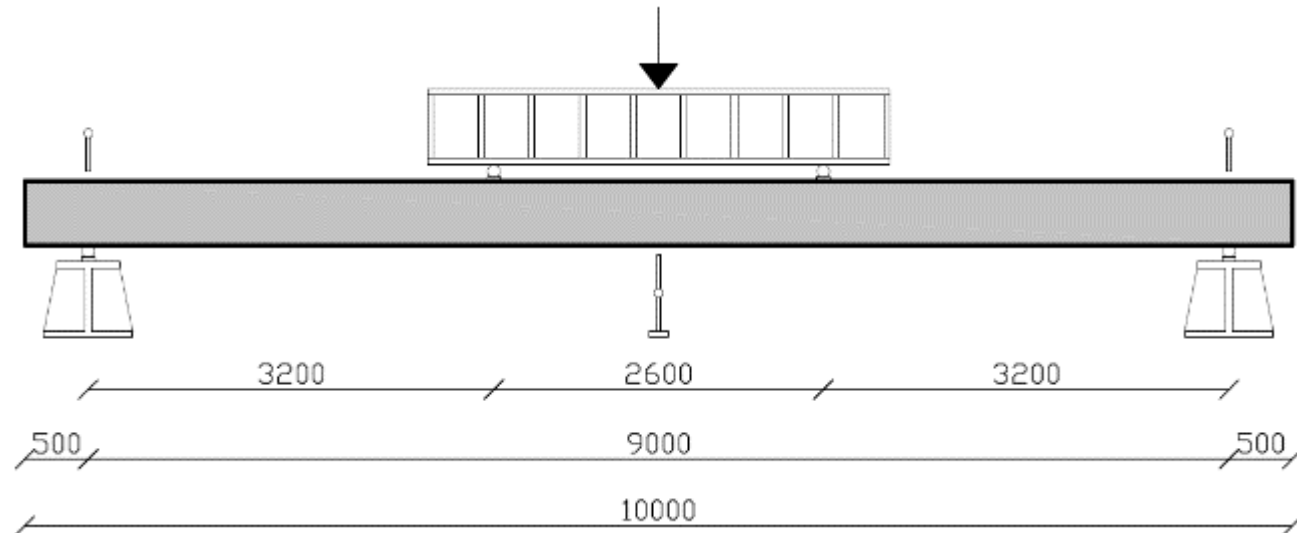
RINFORZO A FLESSIONE-



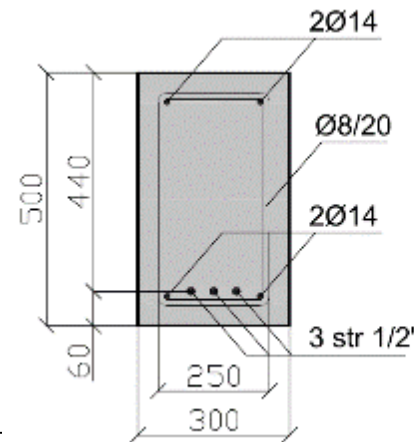
TRAVE	TIPO	TIPO DI RINFORZO	AREA DI FRP (mm ²)
n° 1 RC-C	C.A.	--	--
n° 2 RC-N	C.A.	LENTO AVVOLTO AD "U" AD UNA ESTREMITA' E LIBERO ALL' ALTRA	120
n° 3 RC-EA	C.A.	LENTO ANCORATO	120
n° 4 RC-PrEA	C.A.	PRETENSIONATO ANCORATO	96
n° 5 PRC-PrEA	C.A.P.	PRETENSIONATO ANCORATO	96

RINFORZO A FLESSIONE-SPERIMENTAZIONE

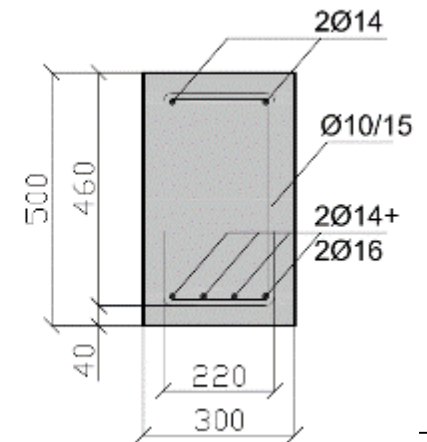
SCHEMA DI CARICO E DIMENSIONI



FASI DEL GETTO DELLE TRAVI



SEZ. C.A.P.



SEZ. C.A.Pag. 42

RINFORZO A FLESSIONE-SPERIMENTAZIONE

LE TRAVI RC-N E RC-EA SONO STATE RINFORZATE CON LAMINATI INCOLLATI ALL' INTRADOSSO TRAMITE RESINA EPOSSIDICA E PREVIA PREPARAZIONE DEL SUBSTRATO DI CLS.

1. RC-N: UN ESTREMO DEL RINFORZO E' LASCIATO LIBERO MENTRE L' ALTRO VIENE FASCIATO CON TESSUTO IN CFRP AVVOLTO A "U"
2. RC-EA: GLI ESTREMI DEL RINFORZO SONO ANCORATI ALLA TRAVE CON PIASTRE IN ACCIAIO



STESURA DEL PRIMER



INCOLLAGGIO E FASCIATURA



RINFORZO A FLESSIONE-SPERIMENTAZIONE

Le travi RC-PrEA e PRC-PrEA sono state rinforzate con **laminati pretesi**.

La pretensione è stata applicata tramite martinetto idraulico in corrispondenza di un'estremità facendo contrasto sulla stessa trave, mentre l'altra estremità è ancorata per mezzo di una piastra in acciaio. Quando si raggiunge il livello previsto di pretensione viene ancorata anche l'altra estremità con la stessa tipologia di piastra metallica.

- Trave RC-PrEA : trave in c.a. con deformazione relativa alla pretensione pari a 0.6%.
- Trave PRC-PrEA : trave in c.a.p. con deformazione relativa alla pretensione pari a 0.4%.

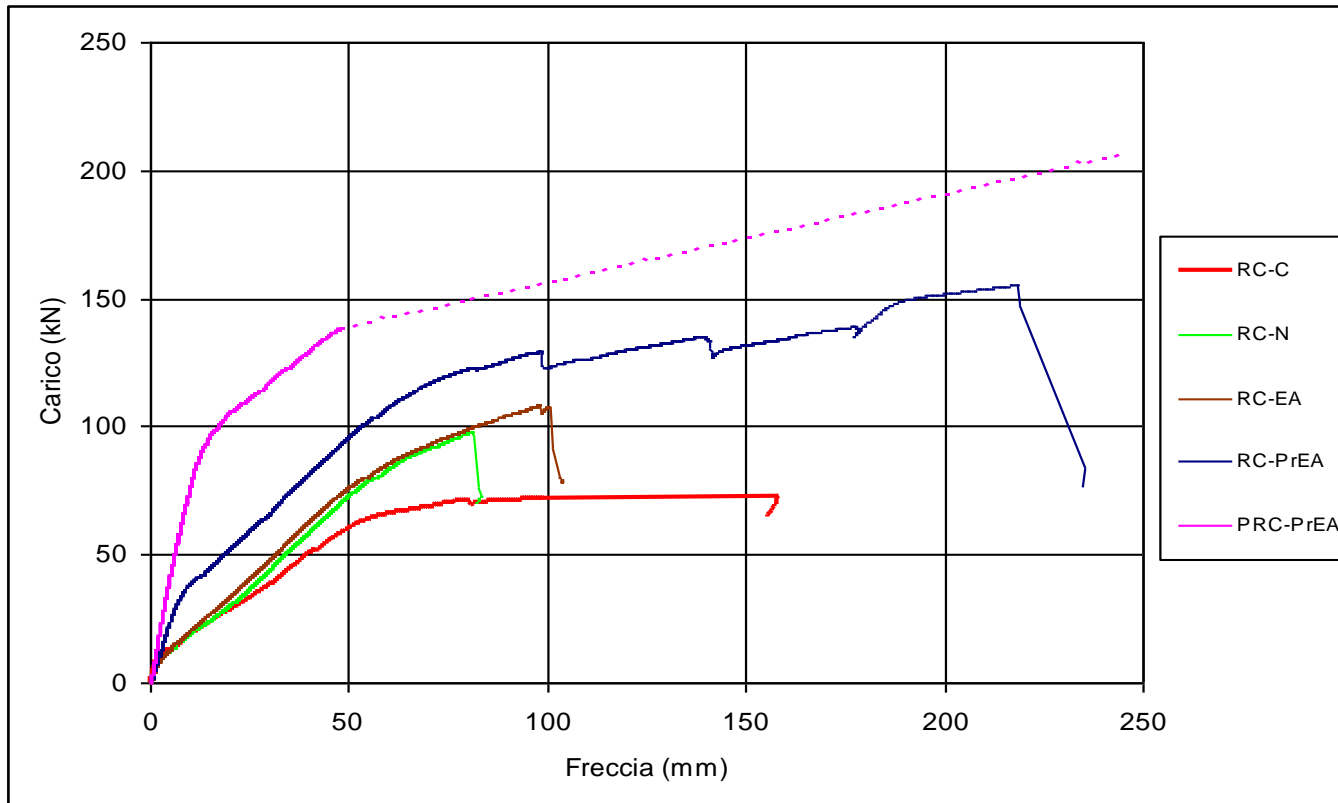


Pretensionamento con martinetto idraulico facente contrasto con la stessa trave.



Piastra d'acciaio all'estremità fissa.

RINFORZO A FLESSIONE-SPERIMENTAZIONE



Incremento del carico ultimo per le travi rinforzate e anche del carico di prima fessurazione per le travi rinforzate con laminati pre-tesi.

RINFORZO A FLESSIONE-CASO STUDIO

La tecnologia che prevede l'uso di laminati CFRP pretesi è stata applicata ad un caso concreto. Si tratta del viadotto "Battiferro-Navile" dell'Autostrada A14 Bologna-Taranto. Il viadotto ha un'età di circa 40 anni e manifestava problemi strutturali dovuti al degrado del calcestruzzo e a significativi incrementi di carichi da traffico.

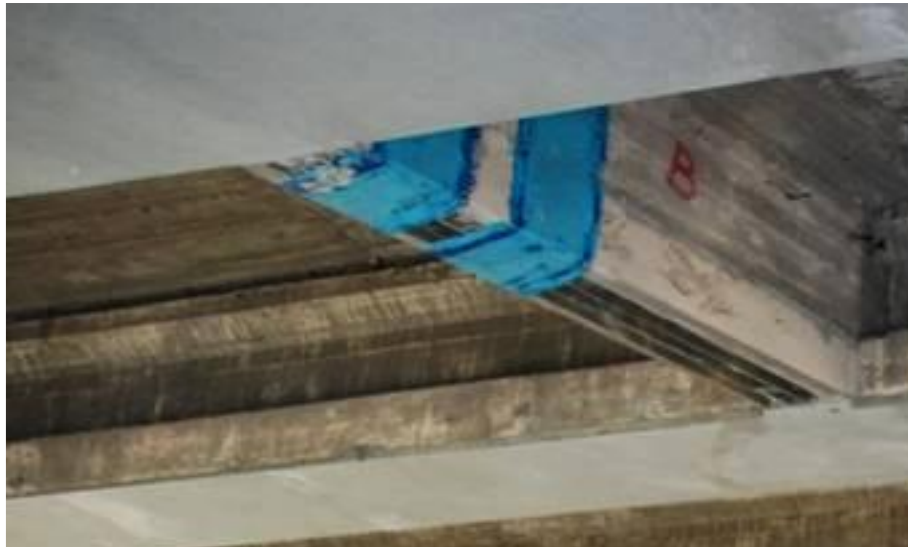


RINFORZO A FLESSIONE-CASO STUDIO

L'intervento ha riguardato **sia le travi longitudinali in c.a.p. che i traversi in c.a.**

Uno strato di laminato in CFRP è stato applicato all'intradosso dei traversi in modo da incrementarne la resistenza a flessione.

Un rinforzo ad "U" è stato applicato alle estremità dei traversi per incrementarne la resistenza a taglio e per un contributo, anche ridotto, all'ancoraggio del rinforzo a flessione.



RINFORZO A FLESSIONE-CASO STUDIO

La procedura per il pretensionamento dei laminati è stata la stessa utilizzata nella sperimentazione.



Foratura delle travi per inserimento bulloni.



Applicazione di uno strato di circa 2mm di resina.



Inserimento del laminato all'estremità fissa



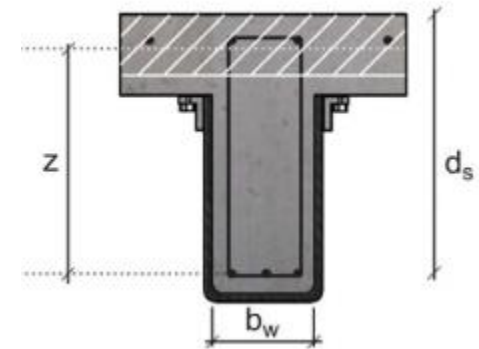
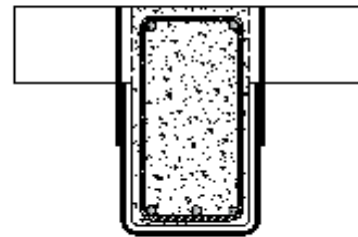
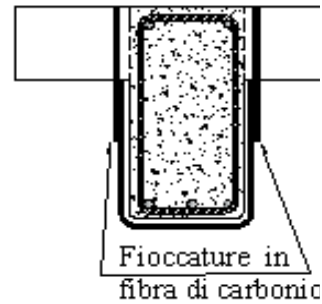
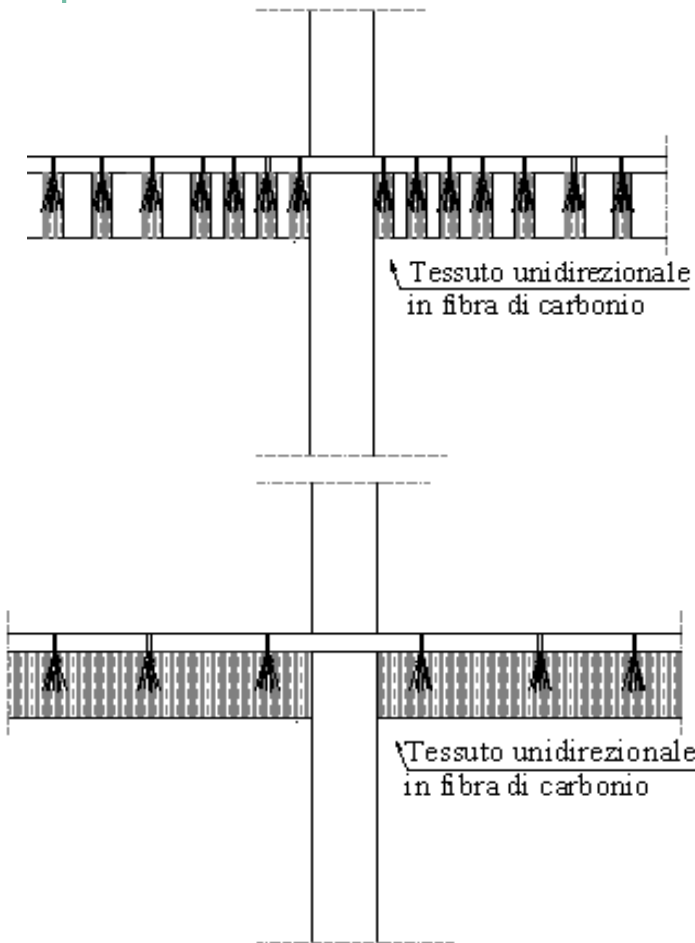
Spinta dei martinetti idraulici sugli ancoraggi mobili all'interno dei quali è ammortato il laminato.

RINFORZO A FLESSIONE-CASO STUDIO

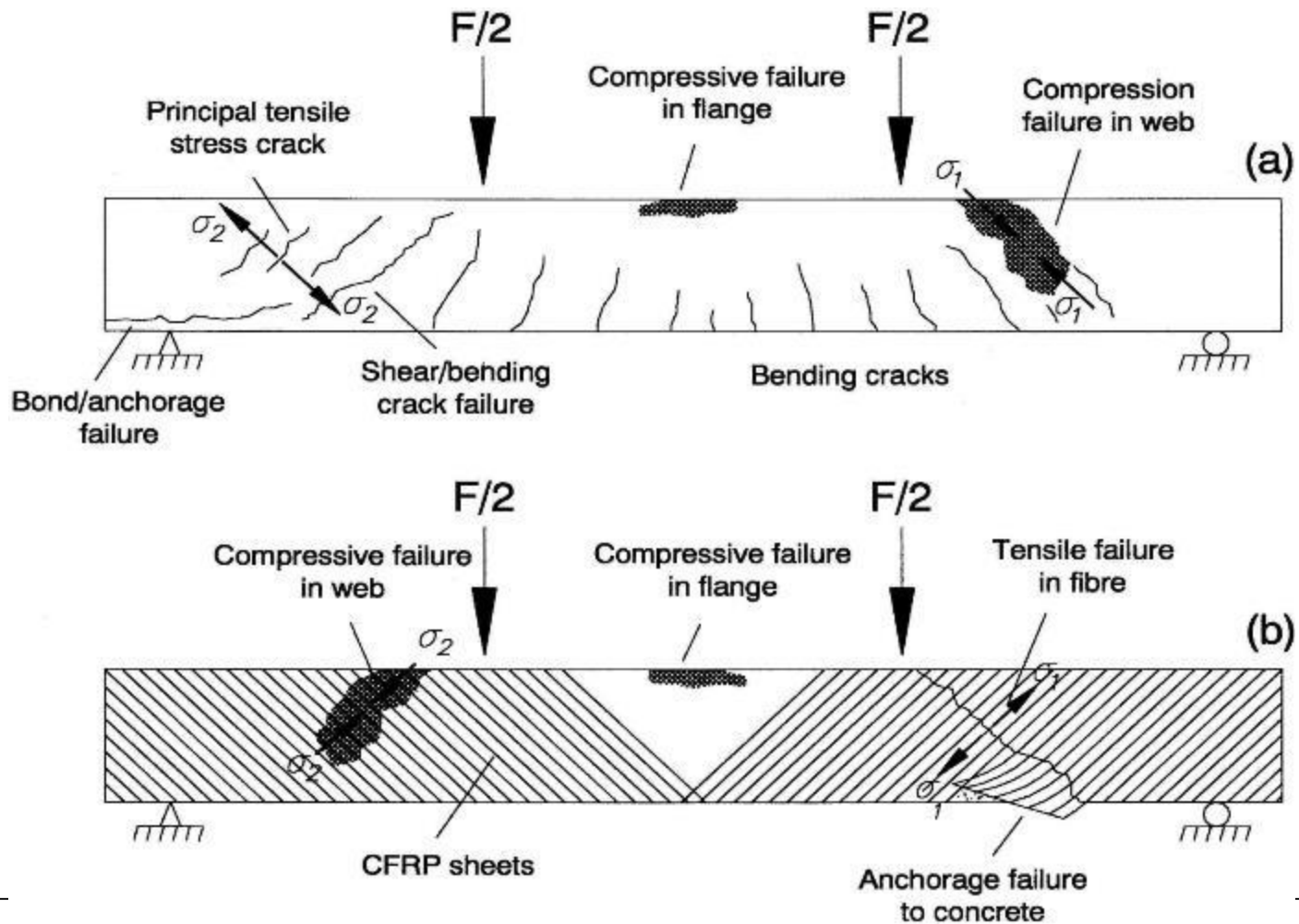
Finalizzazione dell'intervento



RINFORZO A TAGLIO



RINFORZO A TAGLIO – MODALITA' DI ROTTURA



RINFORZO A TAGLIO

RESISTENZA A TAGLIO DI TRAVI NON RINFORZATE

Elementi **senza** armature trasversali resistenti a taglio

$$V_{Rd} \geq V_{Ed}$$

$$V_{Rd} = \left\{ 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \geq (v_{\min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

con

$$k = 1 + (200/d)^{1/2} \leq 2$$

$$v_{\min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$$

e dove

d è l'altezza utile della sezione (in mm);

$\rho_1 = A_{sl} / (b_w \cdot d)$ è il rapporto geometrico di armatura longitudinale ($\leq 0,02$);

$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c$ è la tensione media di compressione nella sezione ($\leq 0,2 f_{cd}$);

b_w è la larghezza minima della sezione (in mm).

RINFORZO A TAGLIO

RESISTENZA A TAGLIO DI TRAVI NON RINFORZATE

Elementi **con** armature trasversali resistenti a taglio

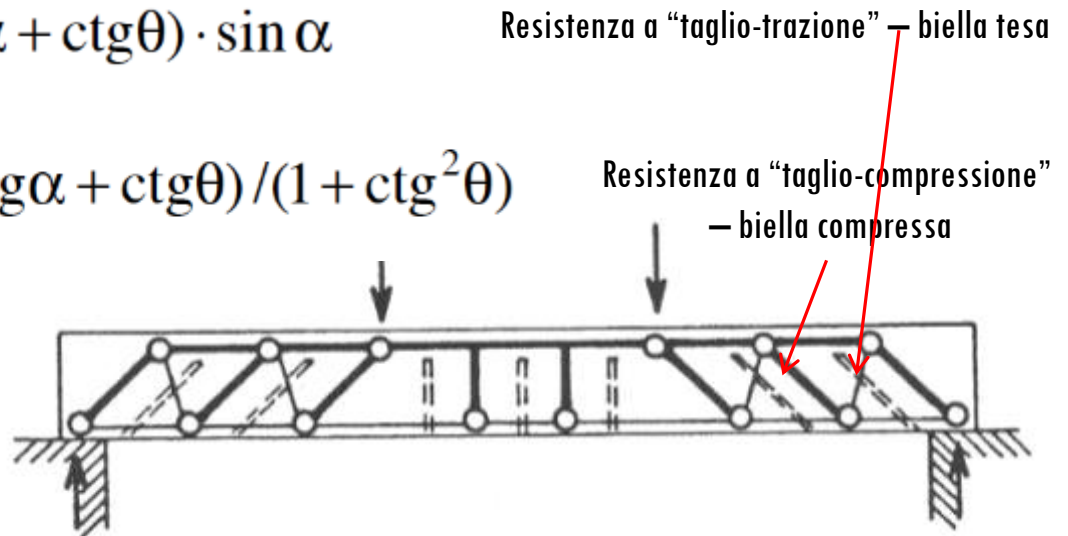
$$V_{Rd} \geq V_{Ed}$$

$$V_{Rsd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \theta) \cdot \sin \alpha$$

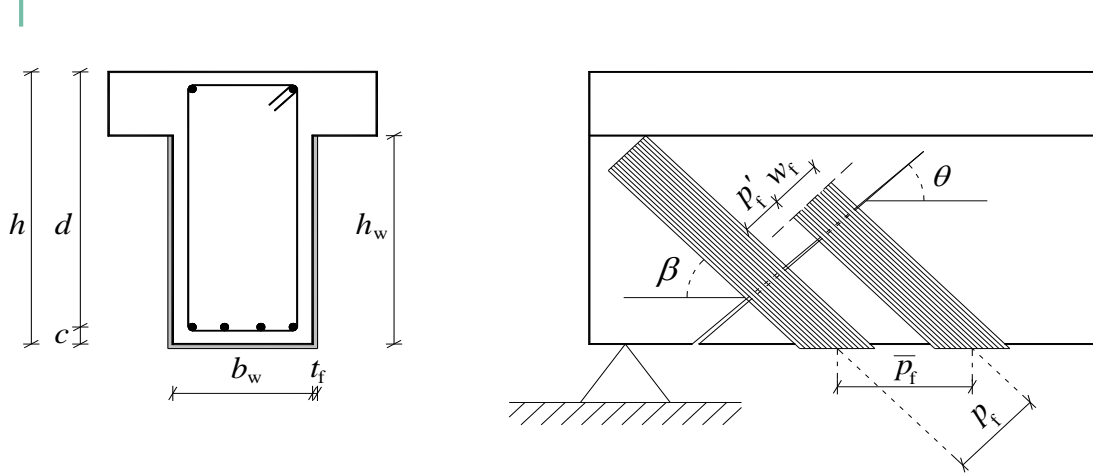
$$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \theta) / (1 + \operatorname{ctg}^2 \theta)$$

$$1 \leq \operatorname{ctg} \theta \leq 2,5$$

$$V_{Rd} = \min (V_{Rsd}, V_{Rcd})$$

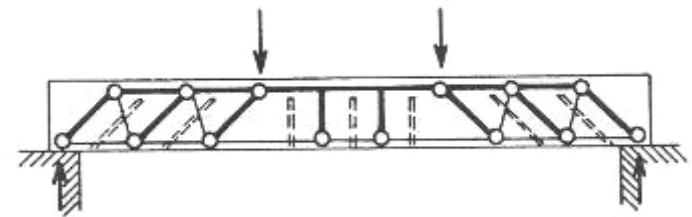


RINFORZO A TAGLIO — CAPACITA' A TAGLIO



La resistenza di calcolo a taglio dell'elemento rinforzato si valuta sempre sulla base del modello a traliccio:

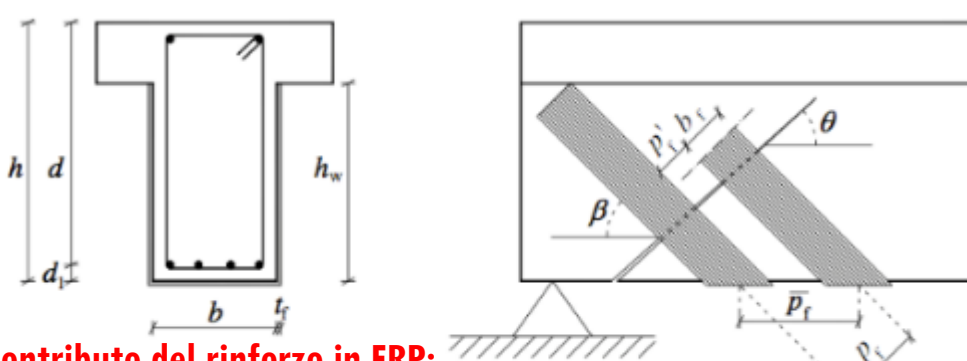
$$V_{Rd} = \min \{ V_{Rd,s} + V_{Rd,f}, V_{Rd,c} \}$$



dove:

- $V_{Rd,s}$ è il contributo dell'armatura trasversale in acciaio, da valutarsi in accordo con la Normativa vigente;
- $V_{Rd,f}$ è il contributo del rinforzo in FRP;
- $V_{Rd,c}$ è la resistenza della biella compressa di calcestruzzo, da valutarsi in accordo con la Normativa vigente.

RINFORZO A TAGLIO — CAPACITA' A TAGLIO



Contributo del rinforzo in FRP:

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

nel caso di rinforzo avvolto ad U o in avvolgimento

γ_{Rd} è il coefficiente parziale da assumersi pari a 1.20;

f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del rinforzo, da valutarsi come in seguito;

t_f è lo spessore della striscia o del foglio in FRP;

β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento;

θ è l'angolo di inclinazione delle fessure da taglio rispetto all'asse dell'elemento;

b_f e p_f sono larghezza e passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre.

Resistenza efficace di calcolo del rinforzo

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d, h_w\}} \right] \quad \text{nel caso di rinforzo ad U}$$

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_c \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d, h_w\}} \right] + \frac{1}{2} (\phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_c \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d, h_w\}} \right] \quad \text{nel caso di rinforzo completamente avvolto}$$

f_{fda} è la resistenza di calcolo alla delaminazione di estremità (modo I)

f_{fd} è la resistenza di progetto a rottura del rinforzo di FRP;

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

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

essendo

β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento;

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

E_f è il modulo di elasticità normale del rinforzo di FRP nella direzione delle fibre;

r_c è il raggio di curvatura dell'arrotondamento dello spigolo della sezione attorno a cui è avvolto il rinforzo

b_w è la larghezza del dell'anima della sezione

l_{ed} è la lunghezza di ancoraggio

Influenza dell'armatura esistente sull'efficienza del rinforzo

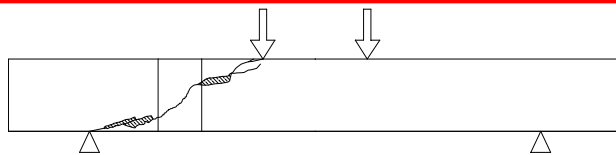
La formulazione descritta in precedenza fornisce la capacità resistente a taglio di una trave in c.a. rinforzata con FRP semplicemente **sommando**, in accordo con l'analisi limite, i **contributi resistenti** del calcestruzzo, dell'acciaio e del composito.

Non tiene conto dei complessi meccanismi di interazione tra l'armatura in acciaio ed il rinforzo in composito.

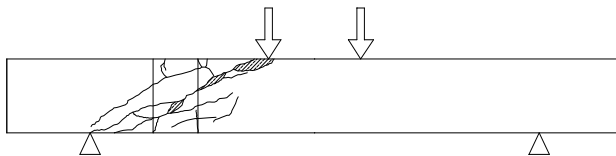
Nel caso di travi con armatura a taglio si è osservato sperimentalmente che:

spesso la rottura per delaminazione del rinforzo avviene per deformazioni inferiori rispetto a quella corrispondente allo snervamento dell'armatura a taglio il che comporta un minore sfruttamento dell'armatura e quindi una minore efficienza del rinforzo.

In sostanza il rinforzo spesso potrebbe andare incontro a distacco prima che l'acciaio possa esplicare tutto il suo contributo resistente.

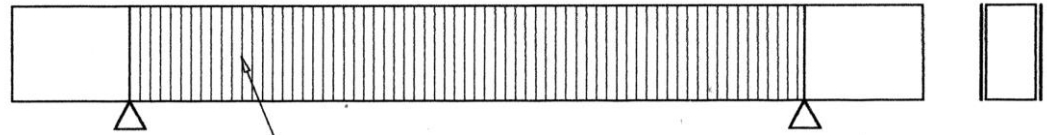
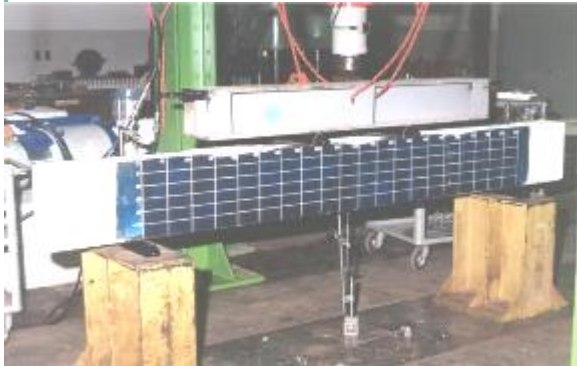


Rottura di una trave **non armata a taglio**

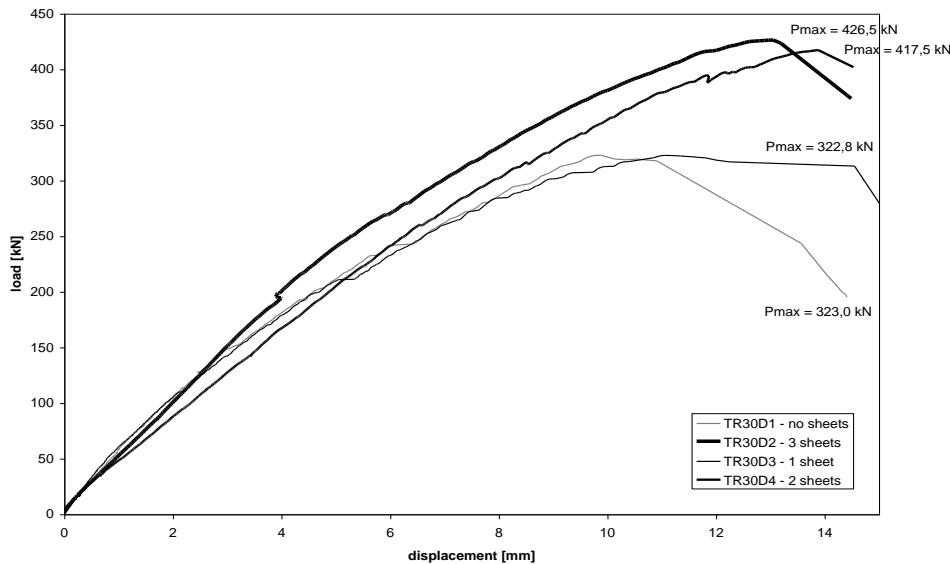
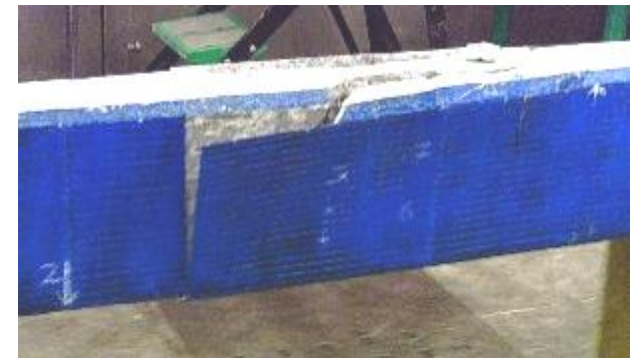


Rottura di una trave **armata a taglio**

RINFORZO A TAGLIO — SPERIMENTAZIONE



1 e 3 strati di CFRP con fibre trasversali all'asse della trave



CONFINAMENTO

Uno degli utilizzi tipici del rinforzo in FRP è quello che riguarda la fasciatura (“**wrapping**”) di colonne o in generale di elementi strutturali che lavorano prevalentemente a compressione.

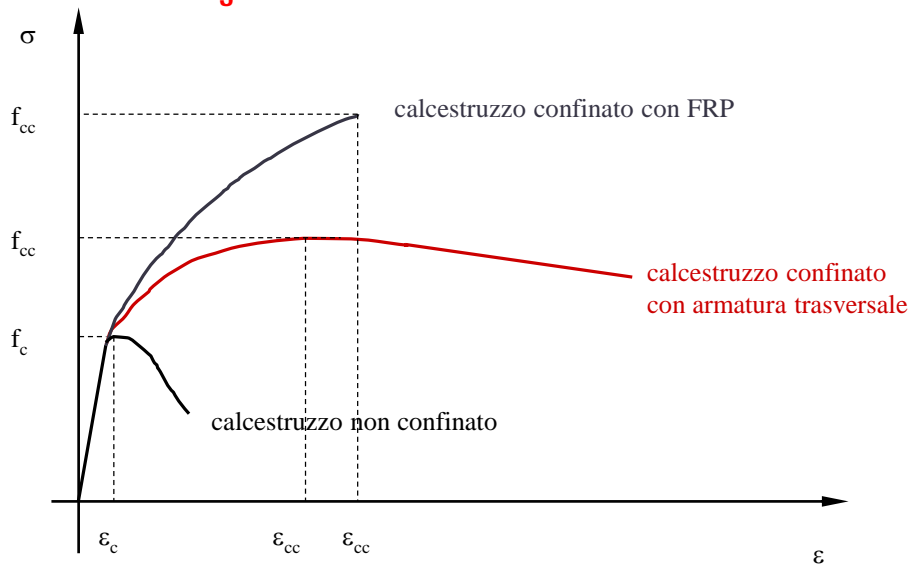
Con la fasciatura si crea, infatti, **un’azione di confinamento** che permette di incrementare la resistenza a compressione globale dell’elemento strutturale. L’effetto è **analogo alla cerchiatura dei pilastri con staffe trasversali o con armatura a spirale**.



CONFINAMENTO

Diagramma tensione-deformazione di:

- una colonna in calcestruzzo non confinata
- una confinata con armatura trasversale in acciaio
- una con fogli FRP avvolti trasversalmente

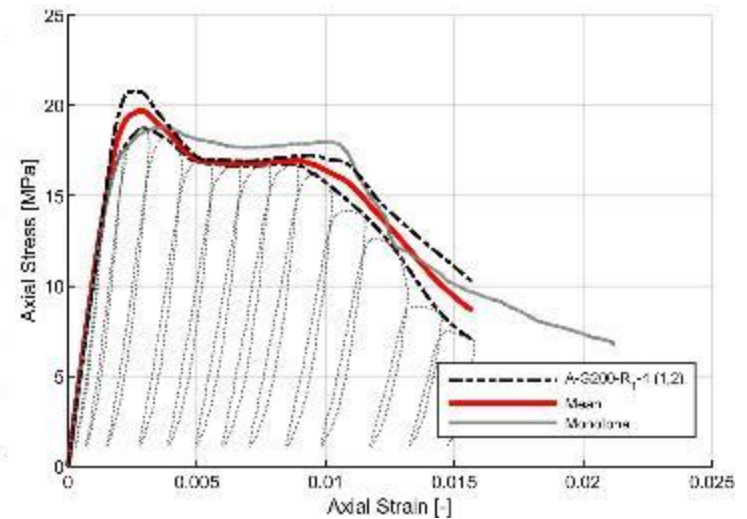
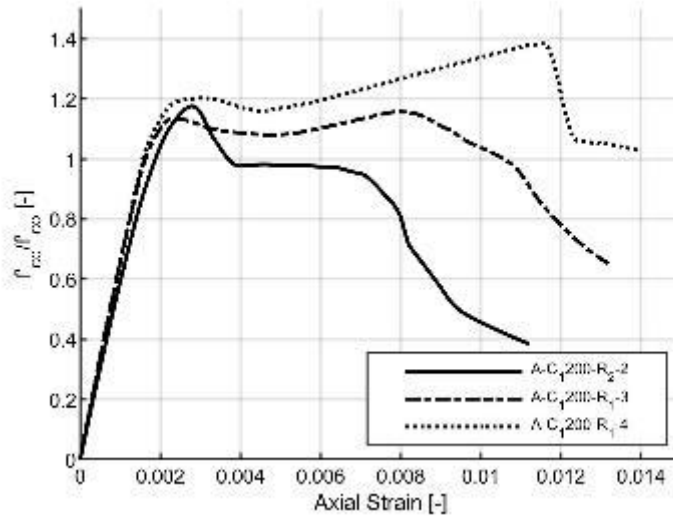


La rottura globale avviene solitamente in maniera improvvisa in quanto legata al cedimento del rinforzo.

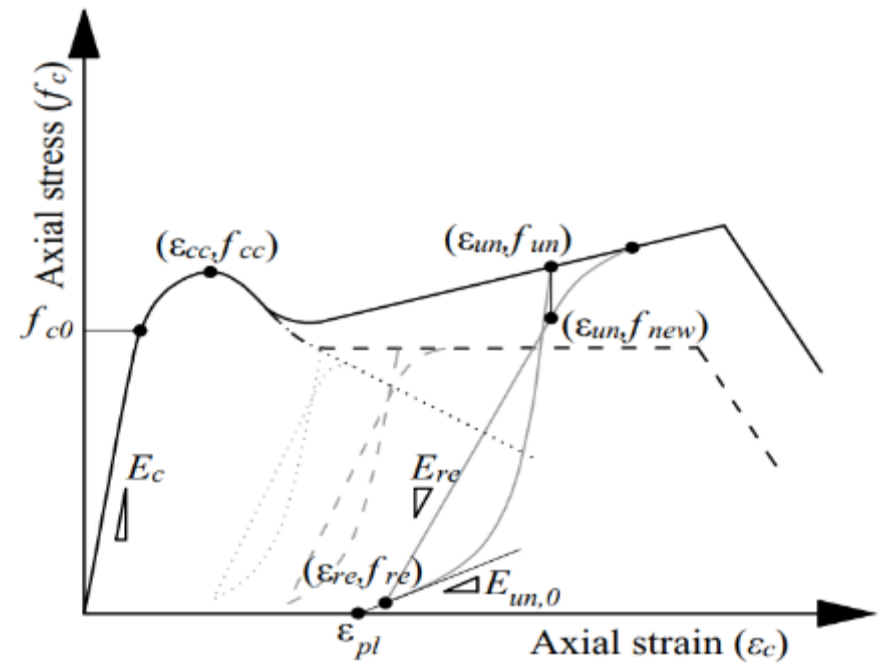
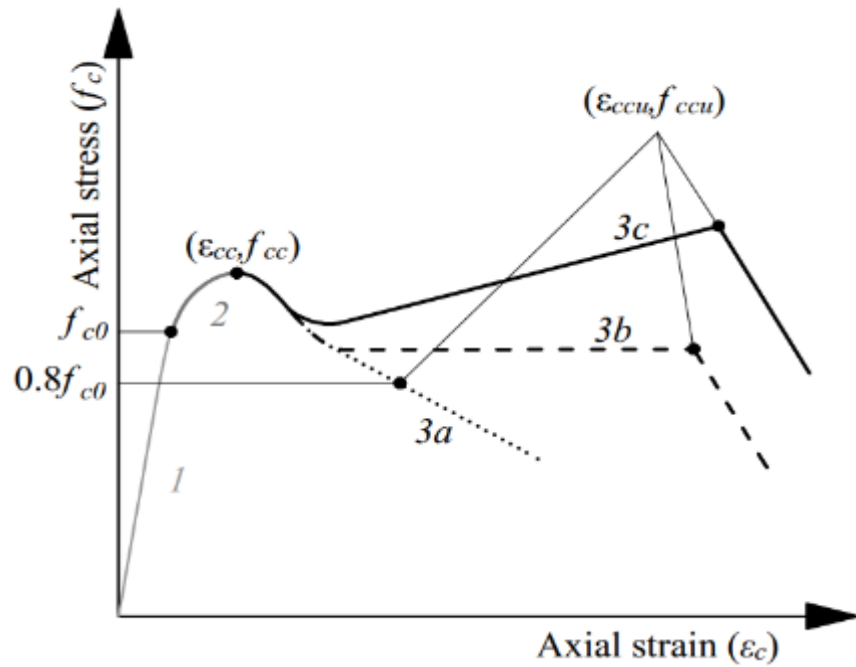
In fase non fessurata l'effetto della fasciatura con FRP risulta piuttosto limitato in quanto le deformazioni trasversali del calcestruzzo risultano anch'esse limitate.

In fase fessurata, invece, il calcestruzzo subisce delle deformazioni rilevanti e conseguentemente il rinforzo trasversale in FRP viene attivato ed agisce in tutta la sua potenzialità incrementando la resistenza a compressione e la capacità deformativa.

CONFINAMENTO FRP VS. FRCM

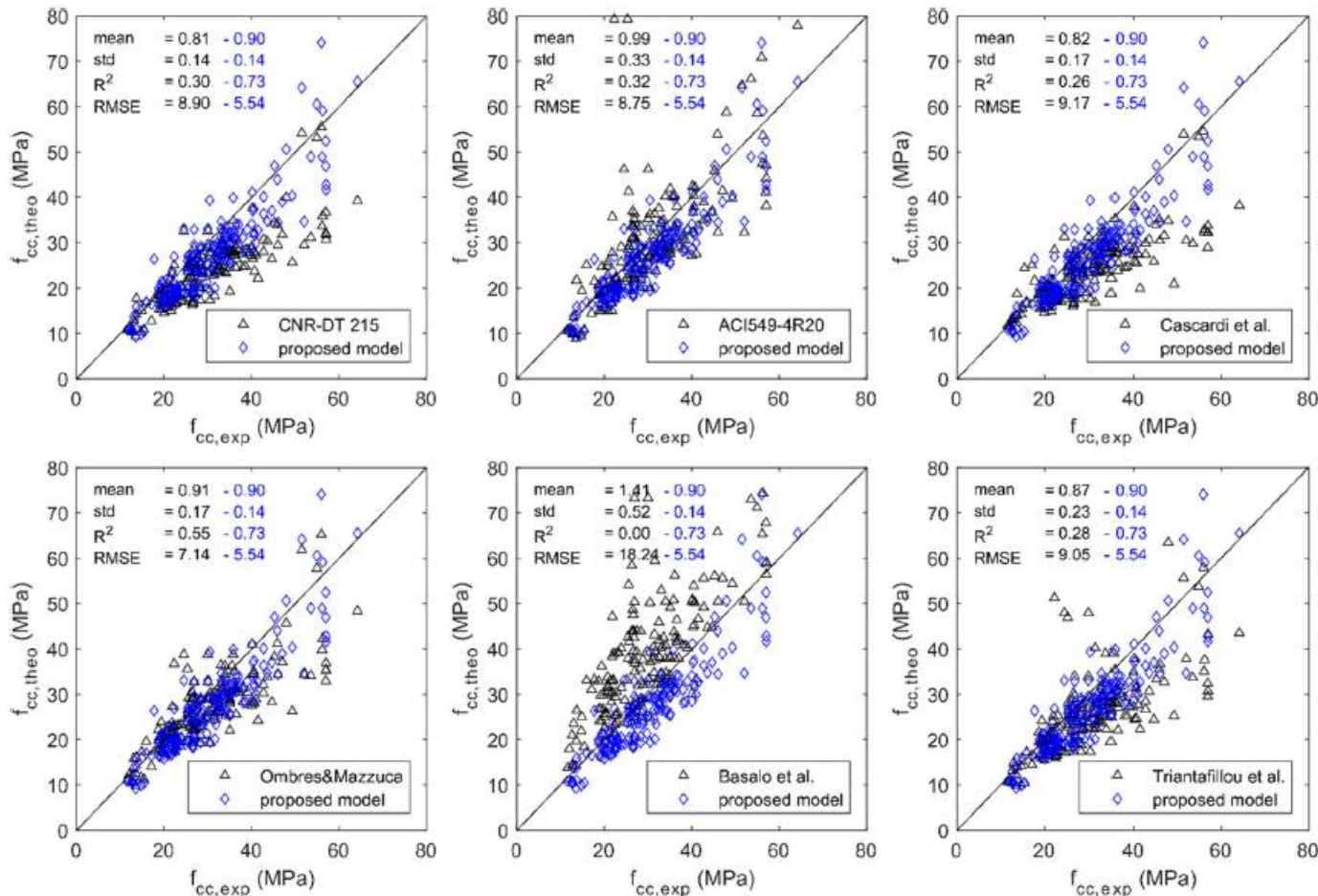


CONFINAMENTO FRP VS. FRCM



Toska and Faleschini (2021)

CONFINAMENTO FRP VS. FRCM



Toska, K., & Faleschini, F. (2023). A new confinement model for FRCM confined concrete. *Materials and Structures*, 56(5), 98.

CONFINAMENTO

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

La verifica dell'elemento confinato consiste nell'accertare che sia soddisfatta la seguente limitazione:

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

In assenza di fenomeni di instabilità per carico di punta, la resistenza ultima di calcolo a sforzo normale centrato, o con piccola eccentricità, di un elemento di c.a. confinato mediante FRP può essere calcolata utilizzando la seguente relazione:

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

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.10, i simboli A_c ed f_{ccd} rappresentano, rispettivamente, l'area della sezione trasversale dell'elemento e la resistenza di calcolo del calcestruzzo confinato (quest'ultima valutata come indicato al punto seguente), mentre i simboli A_s ed f_{yd} denotano, rispettivamente, l'area e la resistenza di calcolo dell'armatura metallica eventualmente presente.

CONFINAMENTO

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

La resistenza di progetto del calcestruzzo confinato, f_{ccd} , può essere valutata con la seguente relazione:

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

nella quale f_{cd} è la resistenza di progetto del calcestruzzo non confinato, da valutarsi come prescritto nella Normativa vigente, ed $f_{l,eff}$ è la pressione efficace di confinamento.

CONFINAMENTO

Pressione laterale di confinamento

La resistenza di un elemento confinato con FRP dipende soltanto da una aliquota della pressione di confinamento, f_l , esercitata dal sistema, detta pressione efficace di confinamento, $f_{l,eff}$.

La pressione efficace di confinamento, $f_{l,eff}$, è funzione della forma della sezione e delle modalità di intervento ed è fornita dalla relazione:

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

dove 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.

CONFINAMENTO

La pressione di confinamento può essere valutata mediante la relazione:

$$f_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid}$$

dove ρ_f è la percentuale geometrica di rinforzo, dipendente, come descritto nel seguito, dalla forma della sezione (circolare o rettangolare) e dalla modalità di applicazione del confinamento lungo l'elemento (fasciatura continua o discontinua), E_f è il modulo di elasticità normale del materiale in direzione delle fibre ed $\varepsilon_{fd,rid}$ è un'opportuna deformazione ridotta di calcolo del composito fibrorinforzato.

La deformazione ridotta di calcolo del composito fibrorinforzato, $\varepsilon_{fd,rid}$, è ottenuta a partire dalla deformazione caratteristica a rottura della fasciatura di FRP, ε_{fk}

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

dove η_a e γ_f sono, rispettivamente, il fattore di conversione ambientale ed il coefficiente parziale del materiale composito fibrorinforzato, i cui valori sono suggeriti, nelle Tabelle precedenti.

CONFINAMENTO

L'intervento di confinamento con FRP risulta particolarmente efficace per elementi a sezione circolare soggetti a compressione centrata o a pressoflessione con modesta eccentricità.

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

La percentuale geometrica di rinforzo, ρ_f , da impiegare nella valutazione della pressione efficace di confinamento è in tal caso fornita dalla relazione:

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

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.

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

CONFINAMENTO

Il confinamento con FRP di elementi a sezione quadrata o rettangolare produce incrementi della resistenza a compressione inferiori rispetto al caso della sezione circolare.

Prima dell'applicazione del sistema di FRP è opportuno procedere ad un arrotondamento degli spigoli della sezione, allo scopo di evitare concentrazioni di tensione localizzate in corrispondenza degli stessi, che potrebbero provocare una rottura prematura del sistema.

Il raggio di curvatura dello spigolo deve soddisfare la limitazione $r \geq 20 \text{ mm}$.

La percentuale geometrica di rinforzo, ρ_f , da impiegare nella valutazione della pressione efficace di confinamento è:

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

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, mentre b e d sono le dimensioni trasversali della sezione rettangolare.

Nel caso di fasciatura continua l'espressione di ρ_f si specializza in $2t_f (b+d) (b \cdot d)$.

CONFINAMENTO

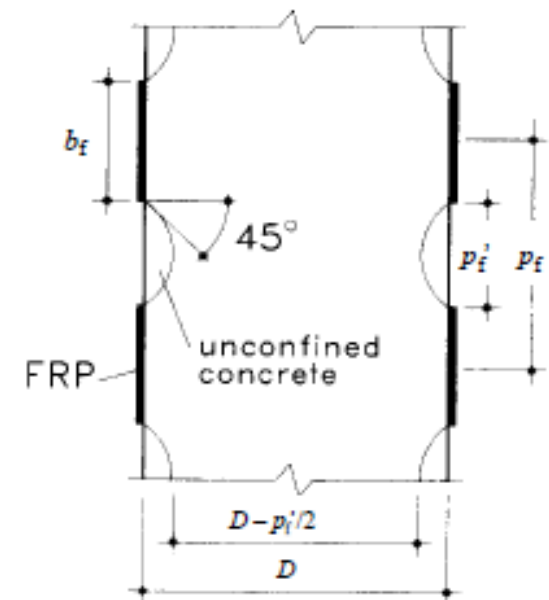
Il coefficiente di efficienza, k_{eff} , può essere espresso come prodotto di un coefficiente di efficienza orizzontale, k_H , per uno di efficienza verticale, k_V , e per un altro ancora legato all'inclinazione delle fibre, k_α

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

Il coefficiente di efficienza orizzontale, k_H , dipende dalla forma della sezione, se circolare o rettangolare, come descritto nel seguito.

Il coefficiente di efficienza verticale, k_V , dipende dalla modalità di applicazione del confinamento lungo l'asse longitudinale dell'elemento. In caso di fasciatura continua si assume $k_V = 1$.

In caso di fasciatura discontinua, realizzata cioè con strisce di FRP, si deve tenere conto della riduzione di efficacia dovuta al fenomeno di diffusione delle tensioni tra due fasciature consecutive. Per effetto della diffusione, in una sezione verticale diametrale, si creano delle zone che non risentono del confinamento.



CONFINAMENTO

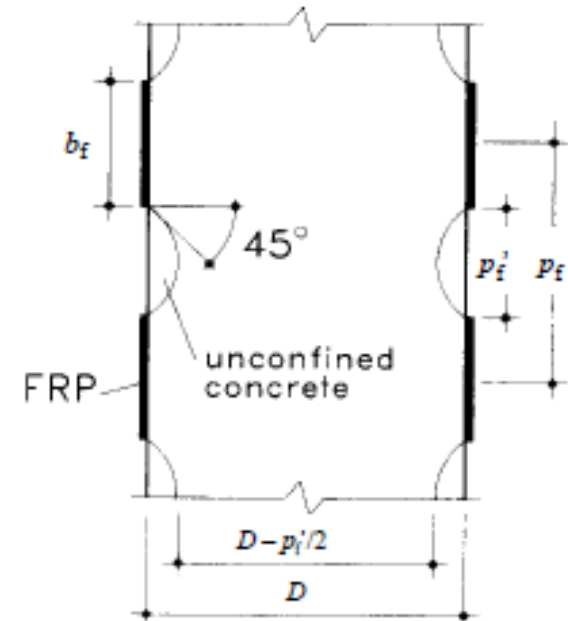
Indipendentemente dalla forma della sezione, il **coefficiente di efficienza verticale**, k_v , che consente di portare in conto il **fenomeno di diffusione verticale delle tensioni**, sopra descritto, può essere assunto pari a:

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

avendo indicato con d_{\min} la minima dimensione trasversale dell'elemento.

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

$$p'_f \leq d_{\min}/2$$



CONFINAMENTO

Indipendentemente dalla forma della sezione, il **coefficiente di efficienza k_α** , da impiegarsi quando le fibre vengano disposte ad elica, con inclinazione α_f delle stesse rispetto alla sezione trasversale dell'elemento, può esprimersi in funzione di α_f come:

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

CONFINAMENTO

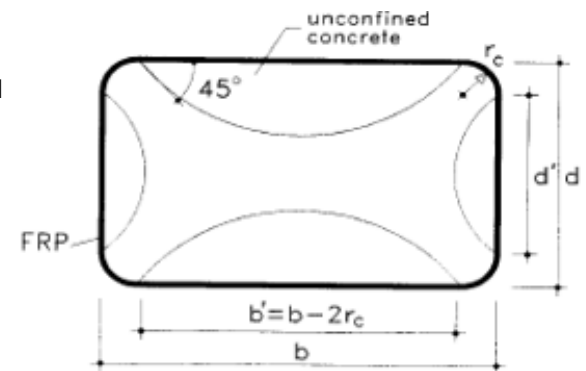
Nel caso di **sezioni rettangolari si può ritenere**, con buona approssimazione, che l'area di calcestruzzo effettivamente confinata sia solo un'aliquota di quella complessiva. La motivazione di tale comportamento è da attribuirsi all'“effetto arco” che si manifesta all'interno della sezione; tale effetto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

Il coefficiente di efficienza orizzontale, k_H , per le sezioni rettangolari, per tener conto dell'effetto arco che si attiva nella sezione trasversale, vale:

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

in cui b' e d' sono le dimensioni indicate in Figura ed A_g è l'area della sezione trasversale. In assenza di adeguate prove sperimentali, che ne comprovino l'efficacia, non va considerato l'effetto del confinamento su sezioni rettangolari per le quali $b/d > 2$, ovvero $\max\{b, d\} > 900\text{mm}$.

Per le sezioni circolari, il coefficiente di efficienza orizzontale, k_H , è pari ad 1.0.



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, caratterizzato da una resistenza massima pari a f_{cd} , il cui tratto costante si estenda fino ad un valore della **deformazione ultima di progetto**, ε_{ccu} , fornito dalla seguente relazione:

$$\varepsilon_{ccu} = 0.0035 + 0.015 \cdot \sqrt{\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}}} \qquad \varepsilon_{fd,rid} = \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} \leq 0.6 \cdot \varepsilon_{fk}$$

essendo $f_{l,eff}$ la pressione efficace di confinamento e f_{cd} la resistenza di progetto del calcestruzzo non confinato e $\varepsilon_{fd,rid}$ deformazione ridotta di calcolo del composito fibrorinforzato per calcolare la pressione efficace.

FRCM

L'USO DI MALTE CEMENTIZIE AL POSTO DELLA RESINA:

FRP -> FRCM



FRCM

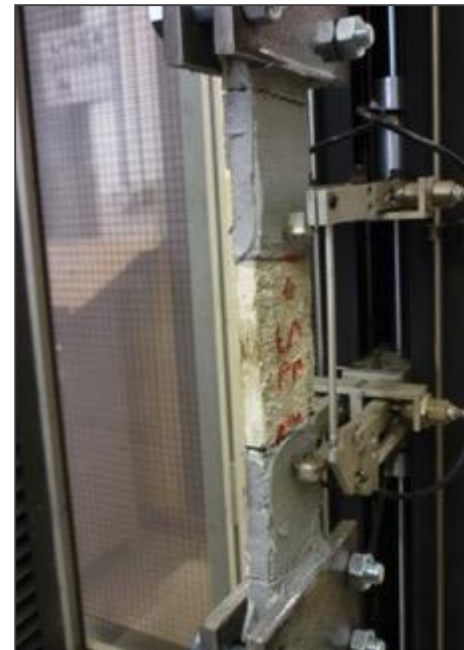
Caratterizzazione del composito: Setup sperimentale (prove presso l'Università di Padova)



Preparazione dei campioni



Setup con gomma alle estremità



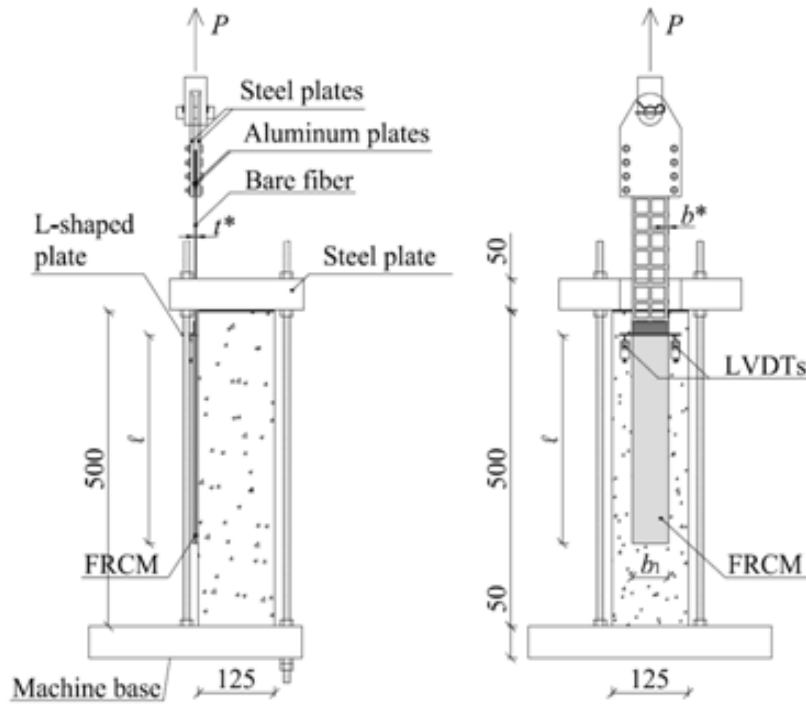
Setup con resina alle estremità



Rottura dei campioni con fibre di acciaio

FRCM

Caratterizzazione del composito: STUDIO DELL'ADERENZA (prove presso l'Università di Padova)



a) Test set-up



b) Specimen DS_CW_330_60_2

FRCM

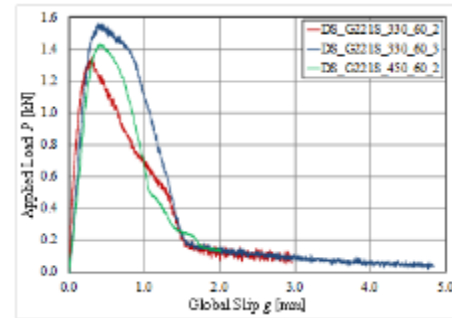
Aderenza: modalità di rottura



a.

b.

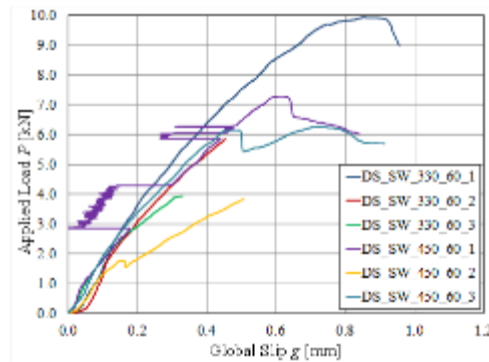
Carbonio — scorrimento fibre all'interno della matrice



a.



Vetro — rottura fibre



a.



b.

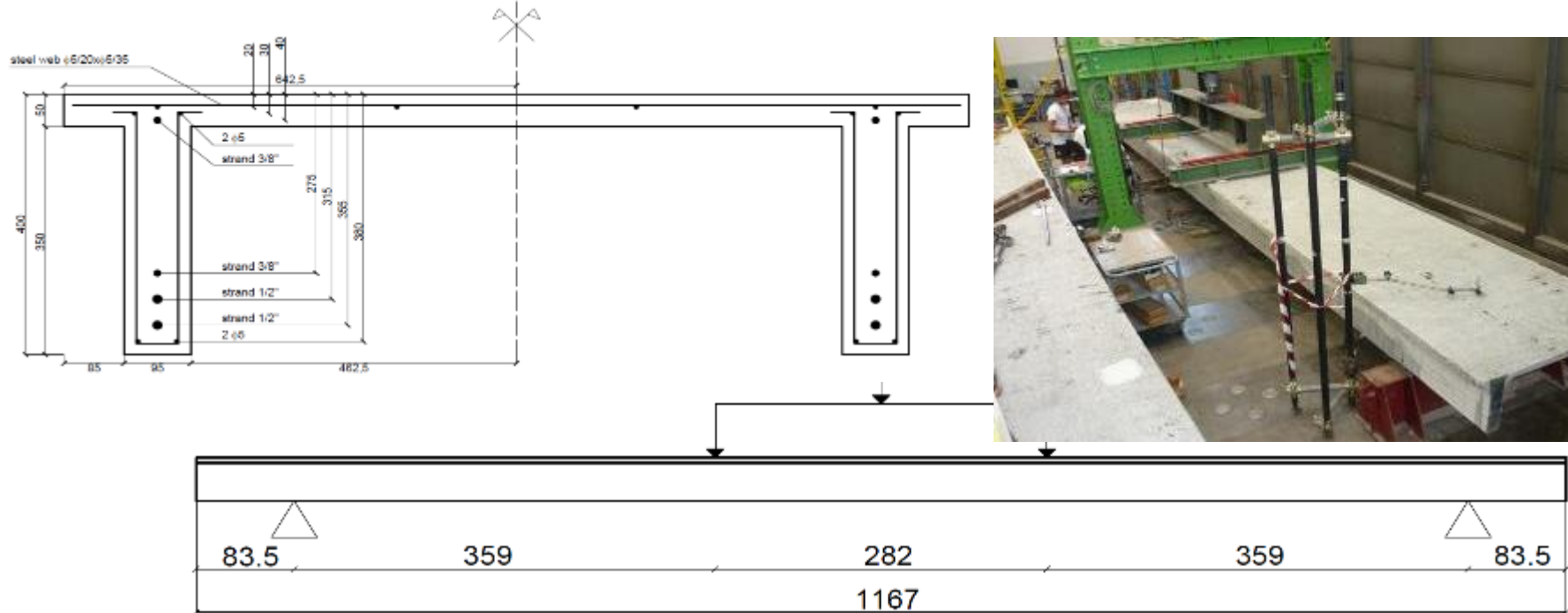


c.

Acciaio — splitting o distacco della matrice dal supporto

FRCM

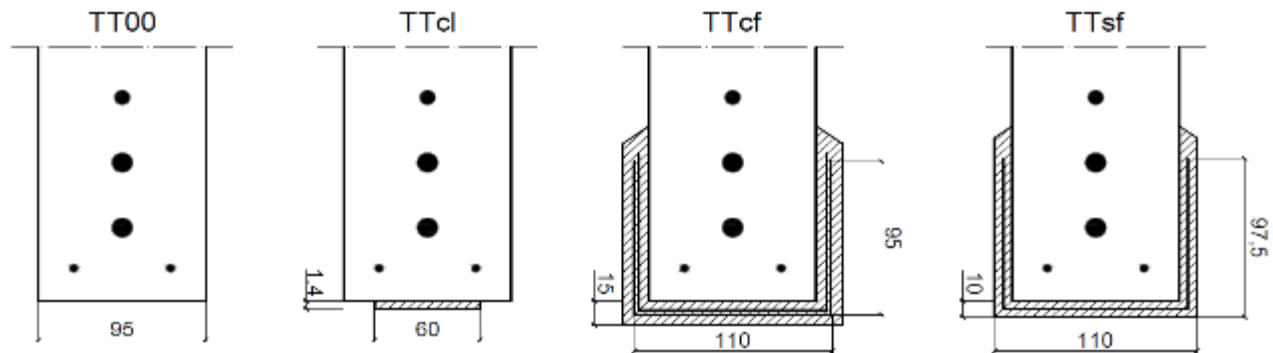
Quattro tegoli prefabbricati PRC con sezione a "TT" sono stati smontati da un edificio industriale esistente, rinforzati con FRP e FRCM, trasportati in laboratorio e successivamente sottoposti a test di flessione su 4 punti per fornire elementi per la comprensione del comportamento di elementi in c.a. in scala reale rinforzati con FRCM.



FRCM

I campioni rinforzati sono stati progettati per ottenere analoghi incrementi della capacità

Rif.	Rinforzo	Spessore [mm]
TT00	Trave di controllo non rinforzata	-
TTcl	Laminato di carbonio + resina epossidica	1.4
TTcf	Fibre di carbonio + malta cementizia	0.117/strato (2 strati)
TTsf	Fibre d'acciaio + malta cementizia	0.220/strato (2 strati)



FRCM

- Molatura e pulizia delle superfici sulle quali verrà applicato il rinforzo;
- Preparazione e applicazione della malta cementizia;
- Applicazione di 2 strati in fibra di carbonio separati da uno strato di malta.



Molatura delle superfici



Applicazione della malta



Applicazione delle fibre di carbonio

FRCM

La trave TT00 di controllo (non rinforzata) ha mostrato una rottura duttile caratterizzata da una significativa inflessione in mezz...



FRCM

La trave TTcl, rinforzata con laminati in carbonio con resina epossidica, ha ceduto per improvvisa delaminazione/distacco del composito.



FRCM

La trave TTcf, rinforzata con fibre di carbonio e malta cementizia, ha ceduto per rottura delle fibre di carbonio in prossimità della mezzeria della trave.

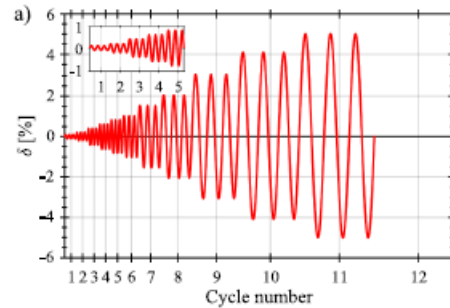


FRCM

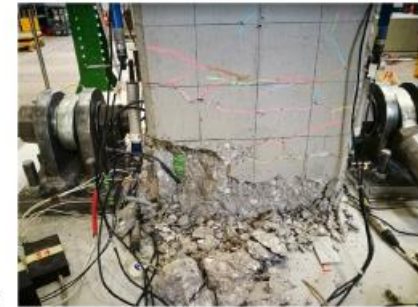
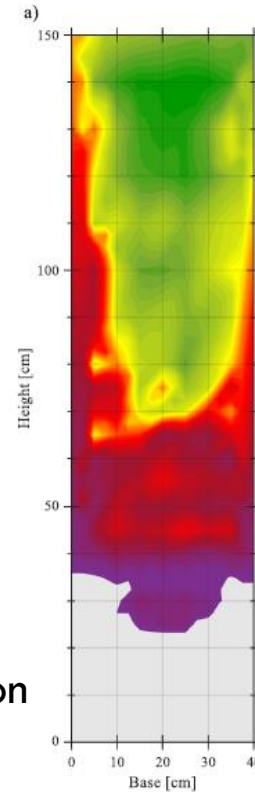
Il tegolo TTsf, rinforzato con rete in acciaio e malta cementizia, ha ceduto per delaminazione/distacco delle fibre d'acciaio nella zona terminale della trave.



FRCM – APPLICAZIONI PER STRUTTURE IN ZONA SISMICA

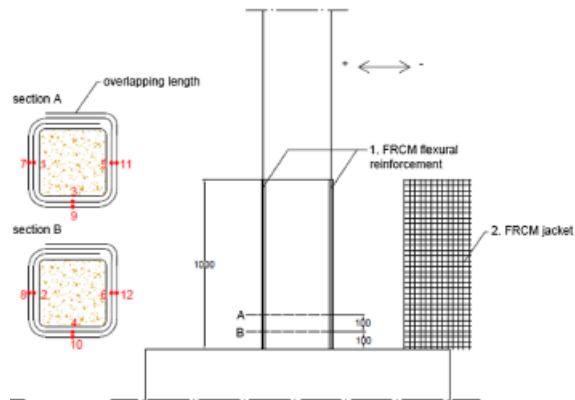


Rinforzo di nodi di base con CFRMC: Danneggiamento



Toska, K., Hofer, L., Faleschini, F., Zanini, M. A., & Pellegrino, C. (2022). Seismic behavior of damaged RC columns repaired with FRCM composites. *Engineering Structures*, 262, 114339.

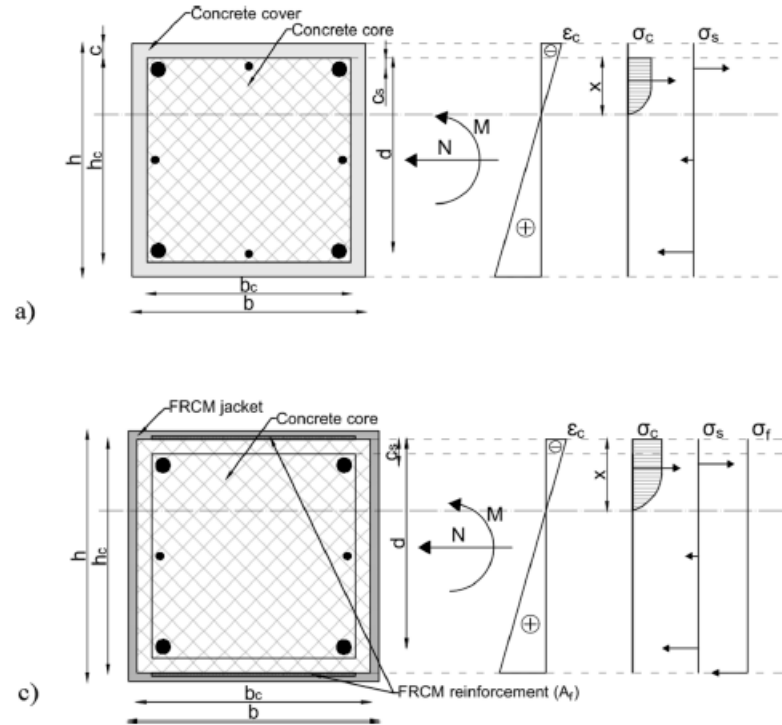
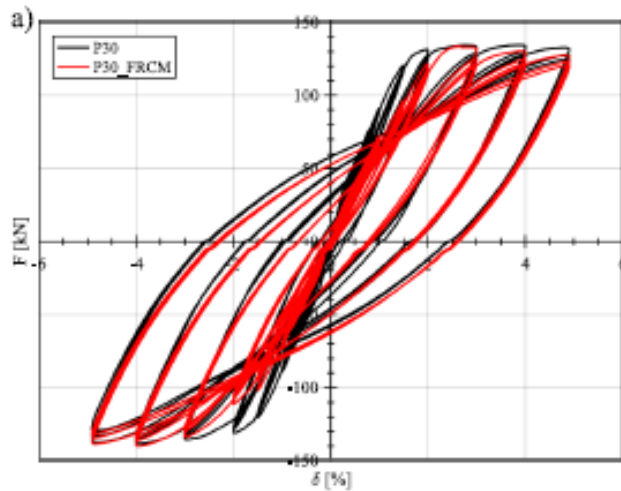
FRCM – APPLICAZIONI PER STRUTTURE IN ZONA SISMICA



Rinforzo di nodi di base con CFRCM: Ripristino e applicazione del rinforzo

Toska, K., Hofer, L., Faleschini, F., Zanini, M. A., & Pellegrino, C. (2022). Seismic behavior of damaged RC columns repaired with FRCM composites. *Engineering Structures*, 262, 114339.

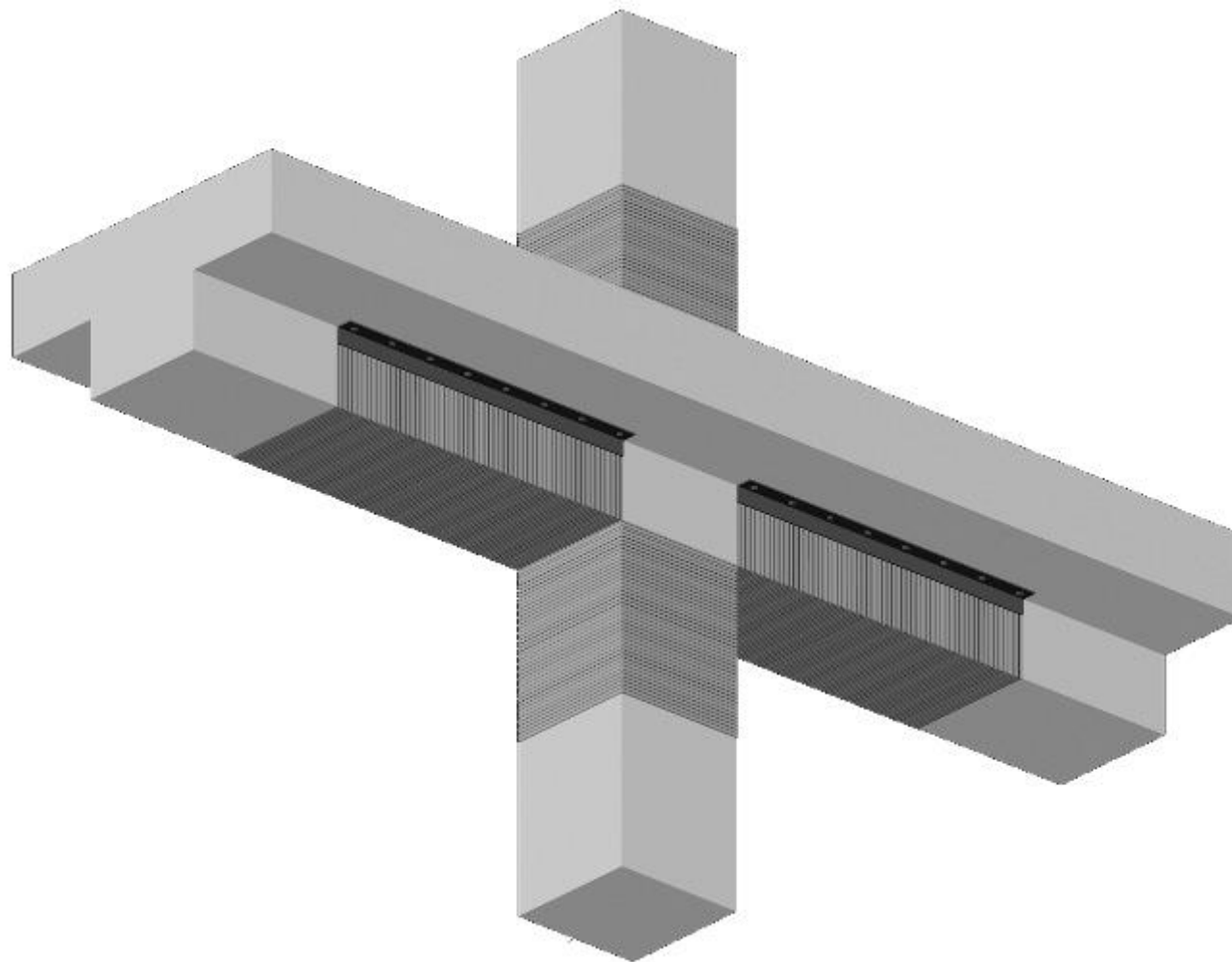
FRCM – APPLICAZIONI PER STRUTTURE IN ZONA SISMICA



Rinforzo di nodi di base con CFRCM: Comportamento globale e analisi sezionale

Toska, K., Hofer, L., Faleschini, F., Zanini, M. A., & Pellegrino, C. (2022). Seismic behavior of damaged RC columns repaired with FRCM composites. *Engineering Structures*, 262, 114339.

ESEMPIO DI CALCOLO



ESEMPIO DI CALCOLO

Il nodo è costituito da una trave a T fuori spessore di larghezza superiore 100cm, larghezza inferiore 40cm, spessore soletta 24cm e altezza complessiva 47cm. L'armatura longitudinale è costituita da 6 ϕ 16 e 2 ϕ 20 superiori ($A_s = 18.35\text{cm}^2$) e da 4 ϕ 16 inferiori ($A_s = 8.04\text{cm}^2$) mentre quella trasversale da staffe ϕ 8/20cm.

In base ai dati forniti si assume cautelativamente per il calcestruzzo:

$$f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c = 26/1.5 = 17.3 \text{ MPa (si assume } f_{ck} = f_{cm} - 8 = 34 - 8 = 26\text{MPa)}.$$

L'acciaio è un FeB38K con $f_{yd} = 325 \text{ MPa}$

Le sollecitazioni agenti sulla trave allo stato limite ultimo sono:

$$M_{\max}^{(-)} = -200\text{kNm}$$

$$M_{\max}^{(+)} = 65\text{kNm}$$

$$V_{\max} = 200\text{kN}$$

Si calcolano quindi **le sollecitazioni resistenti** ottenendo:

$$M_{Rd}^{(-)} = -235\text{kNm}$$

$$M_{Rd}^{(+)} = 107\text{kNm}$$

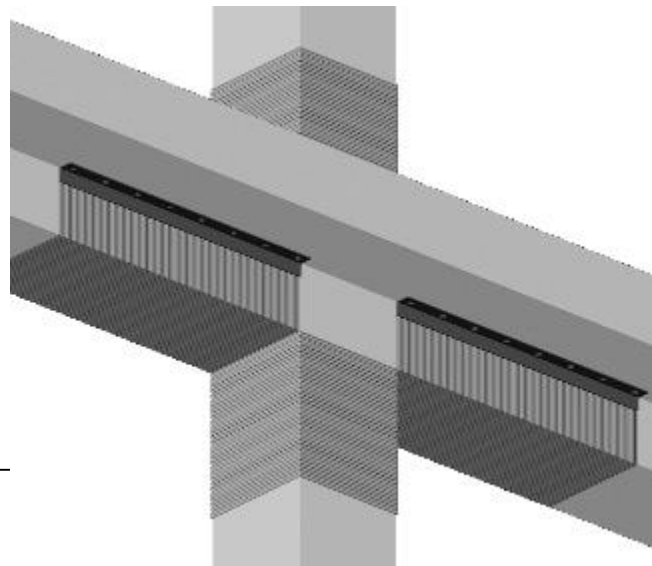
$$V_{Rd} = 158\text{kN}$$

Risulta quindi necessario un rinforzo a taglio.

ESEMPIO DI CALCOLO

Valutazione dell'incremento della resistenza a taglio delle estremità delle travi a T 100/40x47cm

L'incremento di resistenza a taglio delle estremità delle travi consente di prevenire la eventuale crisi per taglio, che rappresenta un meccanismo fragile potenzialmente attivabile. Essa potrebbe essere realizzata mediante una fasciatura ad U con tessuto in carbonio unidirezionale ma data l'altezza ridotta a disposizione sotto la soletta (23cm) si adotta un ancoraggio di tale fasciatura da realizzarsi tramite profili metallici ad L ancorati alla soletta superiore.



ESEMPIO DI CALCOLO

Valutazione dell'incremento della resistenza a taglio delle estremità delle travi a T 100/40x47cm

Si opera con 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 $t_f = 0.165$ mm (1 strato). L'esposizione è esterna (Carbonio/Epossidica) e si considera una applicazione di Tipo A.

Si esegue un arrotondamento degli spigoli $r_c = 20$ mm.

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

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

dove, essendo le fibre trasversali all'elemento, si ha $\beta = 90^\circ$, ed inoltre il rapporto b_f/p_f è unitario nel caso di fasciatura continua.

Per il taglio, secondo il CNR DT-200/2013 si ha $\gamma_{Rd} = 1.2$

ESEMPIO DI CALCOLO

Valutazione dell'incremento della resistenza a taglio delle estremità delle travi a T 100/40x47cm

Nel caso di disposizione ancorata si può fare riferimento al caso in avvolgimento e la resistenza efficace di calcolo del rinforzo è fornita dalla relazione (il secondo termine si considera solo se positivo):

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

dove: $f_{fd} = \eta_a \epsilon_{fk} E_f / \gamma_f = 0.85 \cdot 0.014 \cdot 230000 / 1.1 = 2488 \text{ MPa}$

$$\phi_R = 0.2 + 1.6 r_c / b_w = 0.2 + 1.6 \cdot 20 / 400 = 0.28 \quad 0 \leq r_c / b_w = 20 / 400 = 0.05 \leq 0.5$$

Nella valutazione della resistenza di progetto alla delaminazione (CNR DT-200/2013):

$$f_{fdd} = \frac{\Gamma_{Fd}}{(1/\gamma_{fd}) (2E_f k_b k_G (f_{cm} f_{ctm})^{1/2} / FC t_f)^{1/2}} =$$

$$(1/1.2) \cdot (2 \cdot 230000 \cdot 1 \cdot 0.037 \cdot (34 \cdot 2.63)^{1/2} / 1.35 \cdot 0.165)^{1/2} = 708 \text{ MPa}$$

ESEMPIO DI CALCOLO

Valutazione dell'incremento della resistenza a taglio delle estremità delle travi a T 100/40x47cm

Inoltre la lunghezza di ancoraggio può essere stimata come (CNR DT-200/2013):

$$l_e = (1/f_{bd}) (\pi^2 E_f t_f \Gamma_{Fd} / 2)^{1/2} = (1/(2*0.259/0.25))(\pi^2*230000*0.165*0.259/2)^{1/2} = 106 \text{ mm}$$

La resistenza efficace di calcolo del rinforzo è quindi (CNR DT-200/2013):

$$f_{fed} = 708 [1 - (1/6) 106*1/\min(0.9*430; 230)] + \\ + 1/2 (0.28*2488 - 708) [1 - 106*1/\min(0.9*430; 230)] = 676 \text{ MPa}$$

Finalmente il contributo a taglio della fasciatura:

$$V_{Rd,f} = (1/1.2)*0.9*430*676*2*0.165*(0+1)*1/1000 = 72 \text{ kN}$$

Il taglio resistente della trave rinforzata risulta quindi: $V_{Rd} = 158 + 72 = 230 \text{ kN} > V_{max} = 200 \text{ kN}$

Vanno poi verificati gli ancoranti sulla base della forza massima che può assorbire il tessuto.
(Analogamente si può svolgere il calcolo dell'incremento di taglio resistente del pilastro).

ESEMPIO DI CALCOLO

Valutazione dell'incremento della resistenza a taglio delle estremità delle travi a T 100/40x47cm

Si ipotizza di adottare un avvolgimento con 1 strato di CFRP ($E_f = 230\text{GPa}$ e $t_f = 0.165\text{mm}$) del pilastro immediatamente sopra e sotto la trave in modo da ottenere un incremento di duttilità del pilastro usualmente necessario in ambito sismico.

Tale avvolgimento permette anche un incremento di resistenza a taglio del pilastro, utile per prevenire una possibile rottura fragile per taglio (da evitare nell'ambito del criterio della gerarchia delle resistenze).

Essendo la struttura in classe di duttilità "B" non è necessaria la verifica di resistenza dei pannelli nodali.

ESEMPIO DI CALCOLO

Valutazione dell'incremento della resistenza a taglio delle estremità delle travi a T 100/40x47cm

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

Si valuta innanzitutto l'incremento della capacità deformativa del calcestruzzo; la deformazione ultima di progetto, ε_{ccu} , del calcestruzzo confinato è fornita dalla seguente relazione:

$$\varepsilon_{ccu} = 0.0035 + 0.015 (f_{l,eff}/f_{cd})^{1/2} \quad (\text{CNR DT-200})$$

La resistenza del calcestruzzo non confinato del pilastro f_{cd} è pari a $0.85 \cdot 18 / 1.5 = 10.2$ MPa e la pressione efficace di confinamento è valutata per sezione non circolare.

Si inizia con il valutare la deformazione ridotta di calcolo:

$$\varepsilon_{fd,rid} = \eta_a \varepsilon_{fk} / \gamma_f \leq 0.6 \varepsilon_{fk} \quad (\text{CNR DT-200})$$

ESEMPIO DI CALCOLO

Valutazione dell'incremento della resistenza a taglio delle estremità delle travi a T 100/40x47cm

Nel caso in esame si assume di operare con un tessuto di carbonio unidirezionale con deformazione caratteristica di rottura a trazione $\varepsilon_{gt} = 1.4\%$ e modulo elastico $E_f = 230$ GPa, spessore del tessuto secco $t_f = 0.165$ mm (1 strato).

L'esposizione è esterna (Carbonio/Epossidica) e si considera una applicazione di Tipo A. Si esegue un arrotondamento degli spigoli $r_c = 20$ mm.

Risulta dunque:

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

Ovvero in accordo alla simbologia del CNR DT-200 deve prendersi il minimo tra 1.1% e 0.84% e quindi $\varepsilon_{fd,rid} = 0.84\%$.

Quindi si valuta la percentuale geometrica di rinforzo per fasciatura continua (si assume un pilastro 40x40):

$$\rho_f = 2t_f (b+d)/(bd) = 2 * 0.165 * (400+400)/(400 * 400) = 0.00165 \text{ (CNR DT-200)}$$

ESEMPIO DI CALCOLO

Valutazione dell'incremento della resistenza a taglio delle estremità delle travi a T 100/40x47cm

La pressione di confinamento è quindi valutata come:

$$f_l = 1/2 \rho_f E_f \varepsilon_{fd,rid} = (1/2) * 0.00165 * 230000 * 0.0084 = 1.59 \text{ MPa (CNR DT-200)}$$

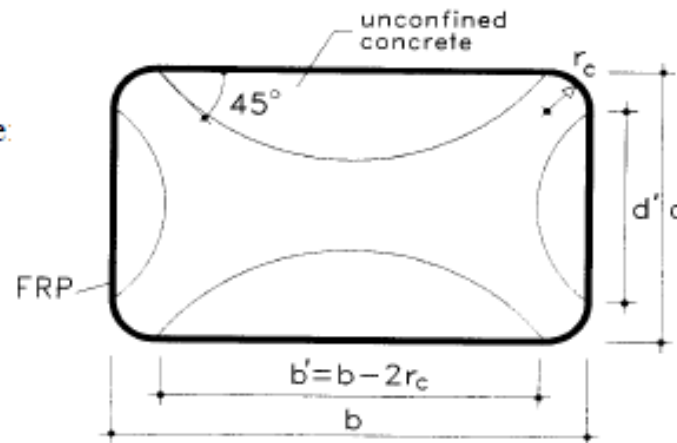
Il coefficiente di efficienza verticale k_v e quello legato all'orientamento della fibra k_a sono unitari, trattandosi di fasciatura continua con fibre unidirezionali trasversali all'asse dell'elemento:

$$k_v = k_a = 1.$$

Il coefficiente di efficienza orizzontale vale invece:

$$\begin{aligned} k_H &= 1 - (b'^2 + d'^2) / 3A_g = \\ &= 1 - (360^2 + 360^2) / (3 * (400 * 400)) \\ &= 0.46 \text{ (CNR DT-200)} \end{aligned}$$

$$k_{eff} = k_H k_v k_a = 0.46 * 1 * 1 = 0.46 \text{ (CNR DT-200)}$$



ESEMPIO DI CALCOLO

Valutazione dell'incremento della resistenza a taglio delle estremità delle travi a T 100/40x47cm

La pressione di confinamento efficace è pertanto pari a:

$$f_{l,eff} = k_{eff} f_l = 0.46 * 1.59 = 0.73 \text{ MPa (CNR DT-200)}$$

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

$$\varepsilon_{ccu} = 0.0035 + 0.015 (f_{l,eff}/f_{cd})^{1/2} = 0.0035 + 0.015 * (0.73/10.2)^{1/2} = 0.0075 = 0.75\%$$