



CNR-200/2004

Rinforzo a flessione di strutture
in c.a. e c.a.p

Giorgio Monti



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



RINFORZO a FLESSIONE

- ✓ Il progetto del rinforzo a flessione deve essere sviluppato effettuando la verifica della sezione più sollecitata a momento flettente, della zona di trave più sollecitata a taglio, e curando i dettagli di incollaggio ed ancoraggio per evitare fenomeni di delaminazione che non consentano il completo sviluppo della capacità resistente dell'elemento rinforzato.
- ✓ L'incremento di resistenza che si può ottenere dipende soprattutto dall'armatura in acciaio preesistente; i migliori risultati si ottengono per le travi poco armate, mentre l'incremento può essere trascurabile per le travi con forte armatura in cui la rottura era dovuta alla crisi del calcestruzzo compresso anche prima dell'applicazione del rinforzo.

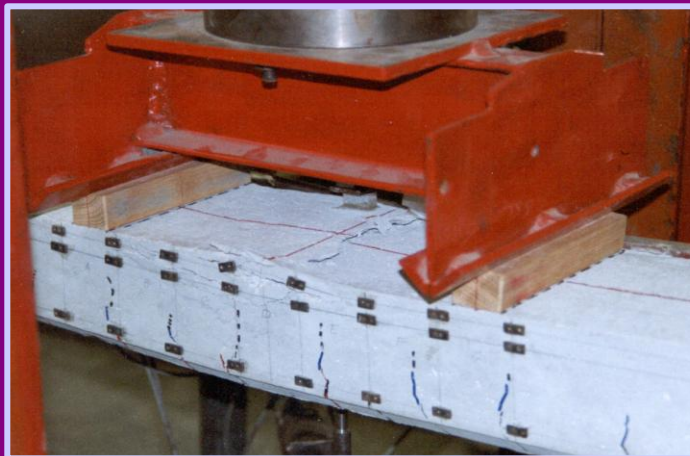
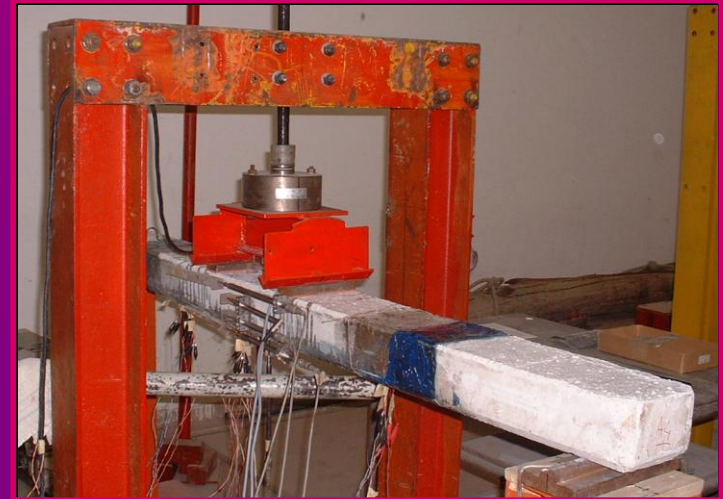
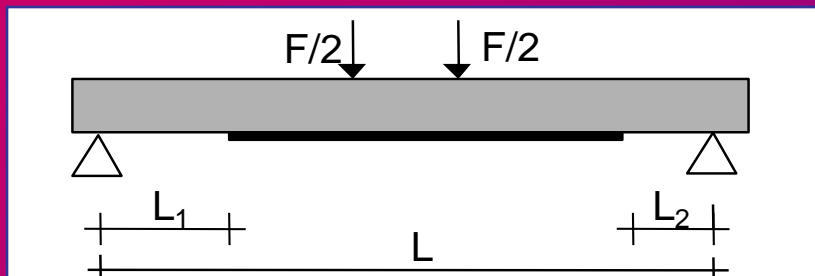
RINFORZO a FLESSIONE

- ✓ È importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto.
- ✓ Poiché generalmente il rinforzo di FRP viene applicato su una struttura già sollecitata, si deve tenere conto dello stato di deformazione della struttura all'atto del rinforzo.

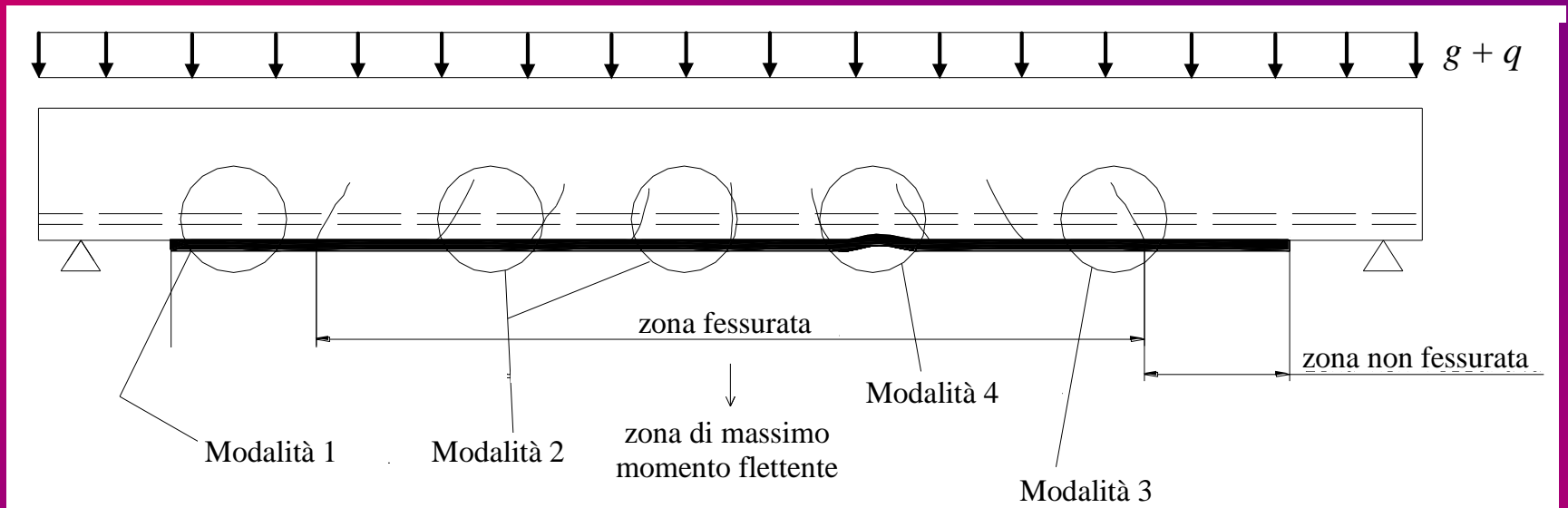
Si ricorda che

di regola, per l'elemento rinforzato, non può essere considerato un incremento della capacità resistente di calcolo superiore al 60% di quella dell'elemento non rinforzato.

✓ *CAMPAGNA SPERIMENTALE: ELEMENTI INFLESSI in C.A.*



modalità di delaminazione



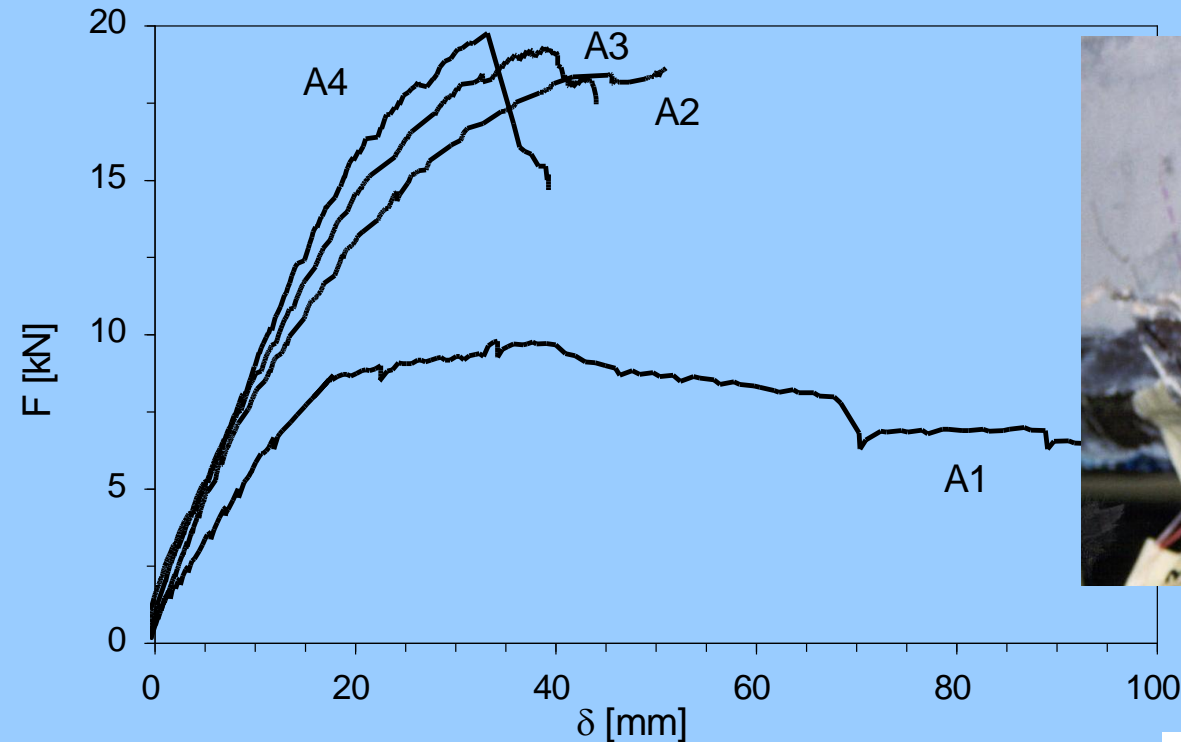
Modalità 1 (Delaminazione di estremità);

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

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

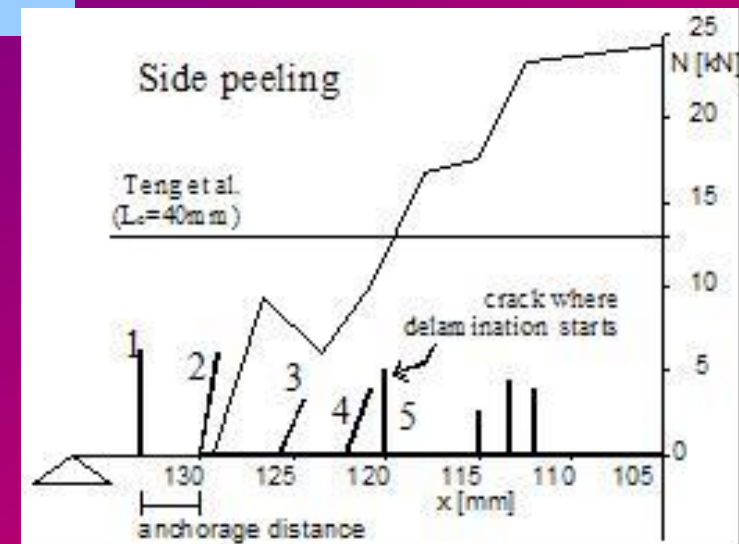
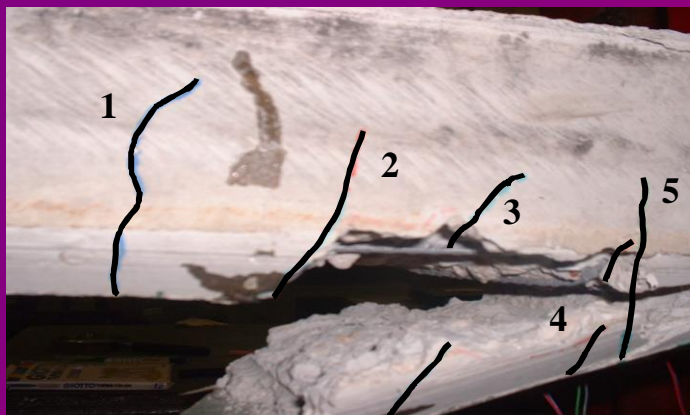
Modalità 4 (Delaminazione causata da irregolarità e rugosità della superficie di calcestruzzo)

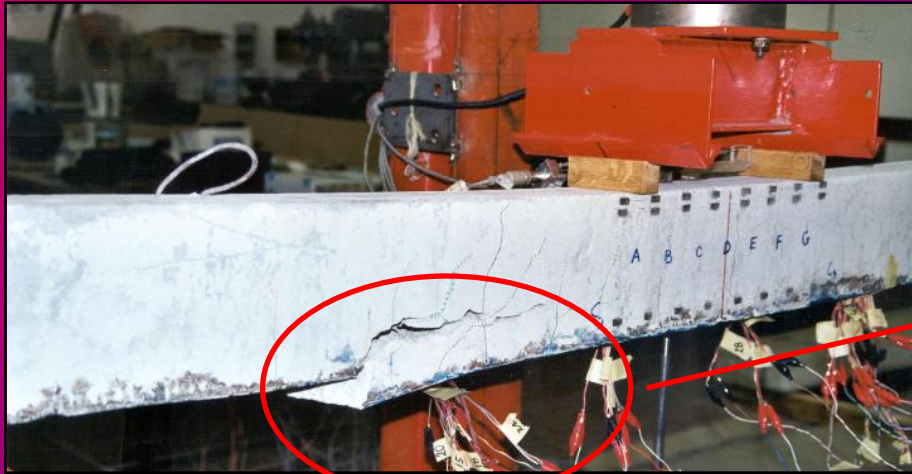
✓ CAMPAGNA SPERIMENTALE: ELEMENTI INFLESSI in C.A.



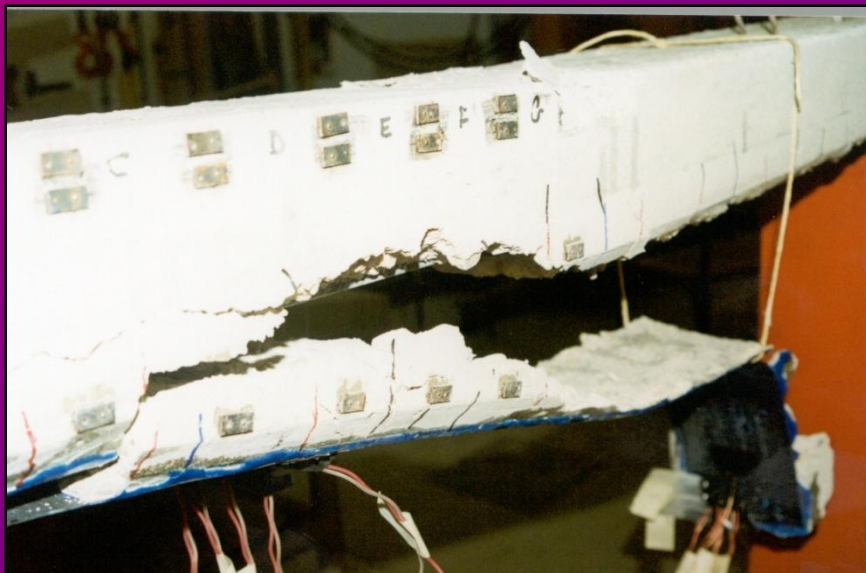
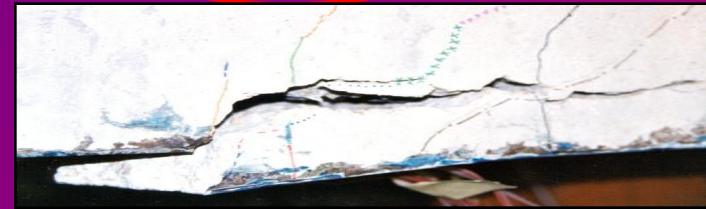
- incremento di rigidezza e di resistenza

- crisi per delaminazione





delaminazione di estremità



delaminazione in mezzeria

Il rinforzo a flessione con compositi si ottiene applicando uno o più strati di **tessuto sulla superficie esterna della zona tesa dell'elemento** da rinforzare.

l'intervento di rinforzo risulta efficace per sezioni a debole armatura

La rottura per flessione si manifesta quando si raggiunge:

- la massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso
- una deformazione massima nella lamina, ε_{fd} , calcolata come:

ε_{fu} è la deformazione ultima a trazione

deformazione di progetto per rottura delle lamina

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

ε_{fdd} è la deformazione massima per delaminazione intermedia

- Se il rinforzo è applicato in presenza di sollecitazioni preesistenti corrispondenti ad un momento M_o , maggiore del momento di fessurazione occorre valutare lo stato deformativo iniziale in ipotesi di comportamento elastico lineare dei materiali e di calcestruzzo non reagente a trazione.
- Se M_o è minore del momento di fessurazione, può essere trascurato.

Con riferimento alla sezione reagente omogeneizzata ($n=E_s/E_c$) il valore dell'asse neutro y_o si ricava dall'annullamento del momento statico:

$$S_n=0 \Rightarrow$$

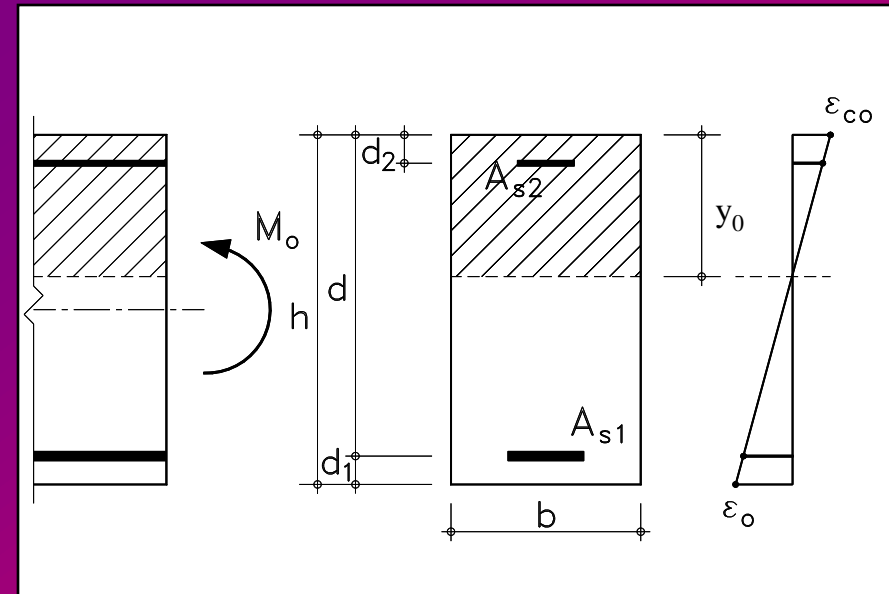
$$by_o \frac{y_o}{2} + nA_{s2}(y_o - d_2) = nA_{s1}(d - y_o)$$

la deformazione nel calcestruzzo al lembo compresso, ε_{co} , e al lembo teso, ε_o , sono per linearità

$$\varepsilon_{co} = \frac{M_o y_o}{E_c I_{co}} \quad \varepsilon_o = \varepsilon_{co} \frac{h - y_o}{y_o}$$

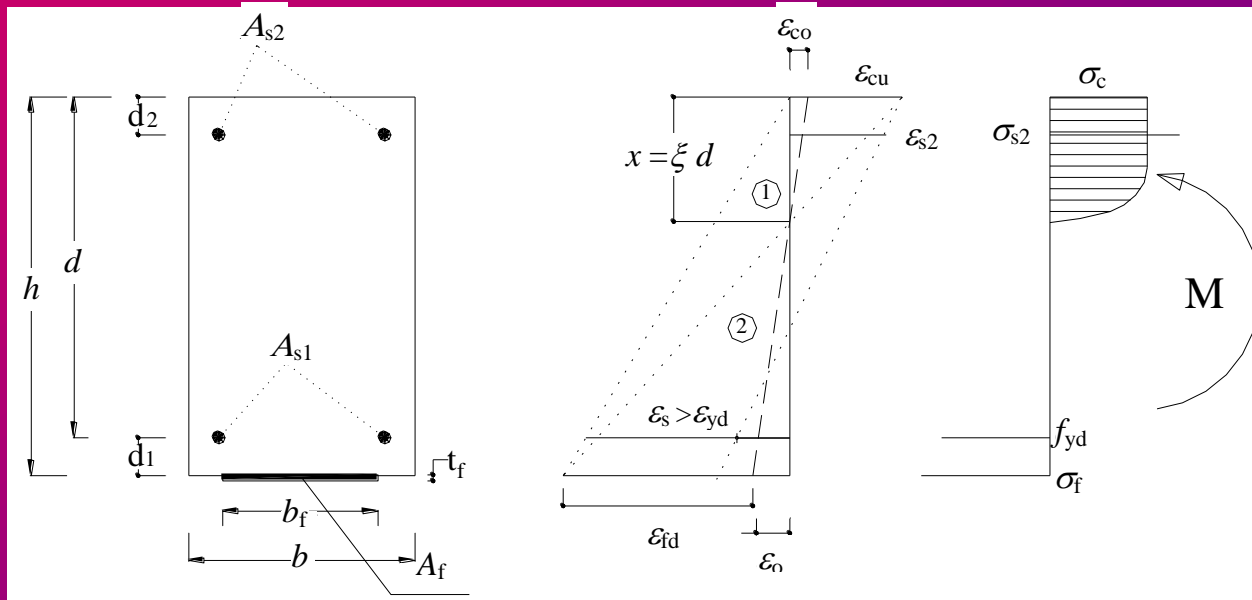
essendo I_{co} il momento di inerzia della sezione omogeneizzata reagente non rinforzata.

$$I_{co} = \frac{1}{3} by_o^3 + nA_{s2}(y_o - d_2)^2 + nA_{s1}(d - y_o)^2$$



La deformazione ε_o rappresenta quindi l'aliquota già presente in corrispondenza delle fibre di calcestruzzo dove verrà applicata la lamina.

condizioni di rottura



- ☞ **zona 1** la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione elastica limite di progetto nelle fibre ε_{fd}
- ☞ **zona 2** la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, quando nelle fibre non è stata ancora raggiunta la deformazione limite

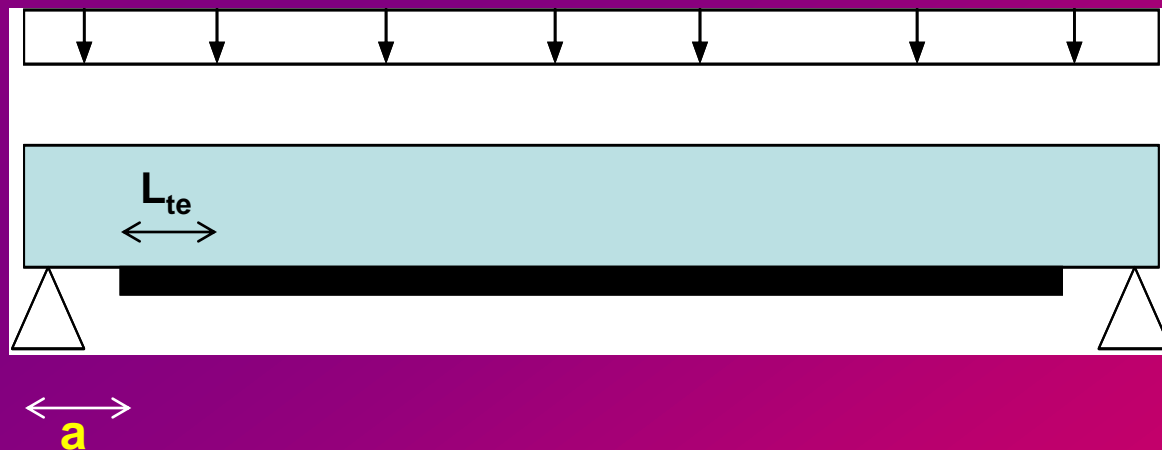
Le deformazioni normali nelle diverse fibre della sezione retta dell'elemento si calcolano per linearità assumendo come punto noto la deformazione ε_{fd} nelle fibre per la zona 1 e la deformazione ultima plastica del calcestruzzo ε_{cu}

- Se gli acciai sono in fase elastica le tensioni si ottengono moltiplicando le deformazioni per il modulo elastico, altrimenti si assumono pari al limite di snervamento.
- La tensione nella lamina può essere calcolata come prodotto della deformazione per il modulo elastico della lamina.
- Per evitare che l'acciaio teso sia in campo elastico, l'asse neutro adimensionalizzato $\xi=x/d$ non deve superare il valore limite tale che

$$\xi_{\text{lim}} = \frac{\varepsilon_{\text{cu}}}{\varepsilon_{\text{cu}} + \varepsilon_{\text{yd}}}$$

✓ Collasso per delaminazione

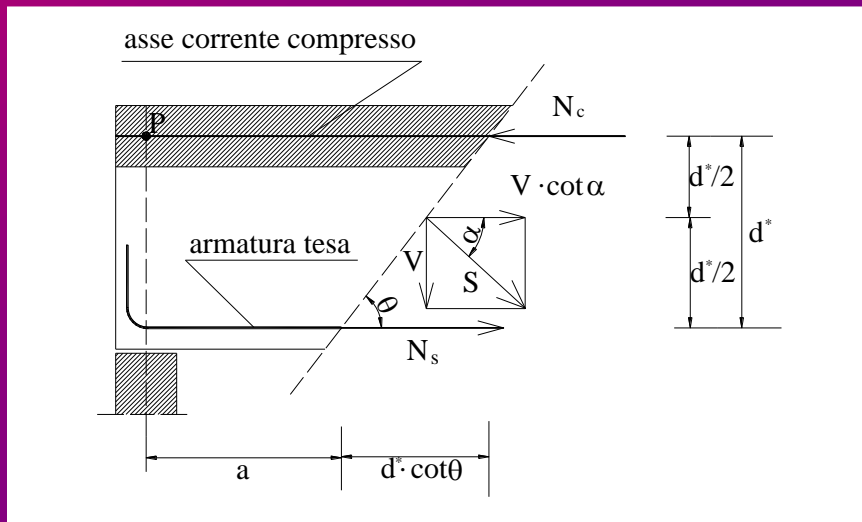
- La delaminazione dipende da una serie di fattori: ubicazione della zona di formazione delle fessure e la tipologia di queste ultime (fessure taglianti e/o flessionali), la presenza di irregolarità sulla superficie di applicazione del rinforzo, la concentrazione di tensioni nelle zone di ancoraggio.
- Per travi in c.a., la distanza massima 'a' dall'appoggio a cui applicare la lamina senza che sia abbia delaminazione si calcola uguagliando la massima forza di trazione trasferibile, F_{max} , alla forza di trazione trasferita ad una distanza $a+l_e$ dall'appoggio sotto l'azione del carico ultimo agente sull'elemento. I valori della massima forza trasferibile, F_{max} , e della lunghezza di ancoraggio, l_e , si calcolano con le formule di ancoraggio riportate al § 4.2.3.



Se l'ancoraggio si realizza in una zona con elevate sollecitazioni taglianti, che possono indurre fessure inclinate, la forza di ancoraggio del rinforzo deve essere valutata incrementando il momento di calcolo sollecitante della quantità:

$$M = V_{sdu} \cdot a_1$$

dove V_{sd} è il taglio sollecitante di progetto, $a_1 = 0.9 \cdot d \cdot (1 - \cot \alpha)$, α è l'inclinazione dell'armatura a taglio e d è l'altezza utile della sezione.



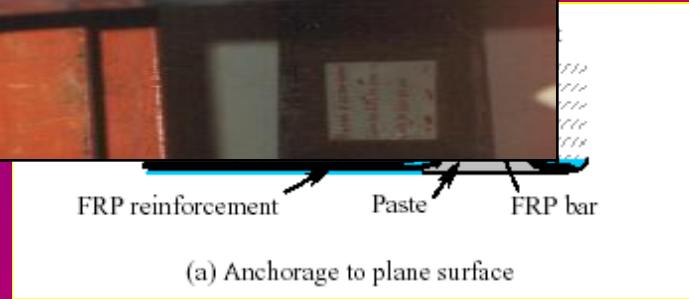
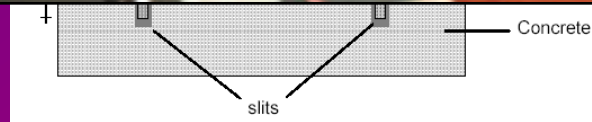
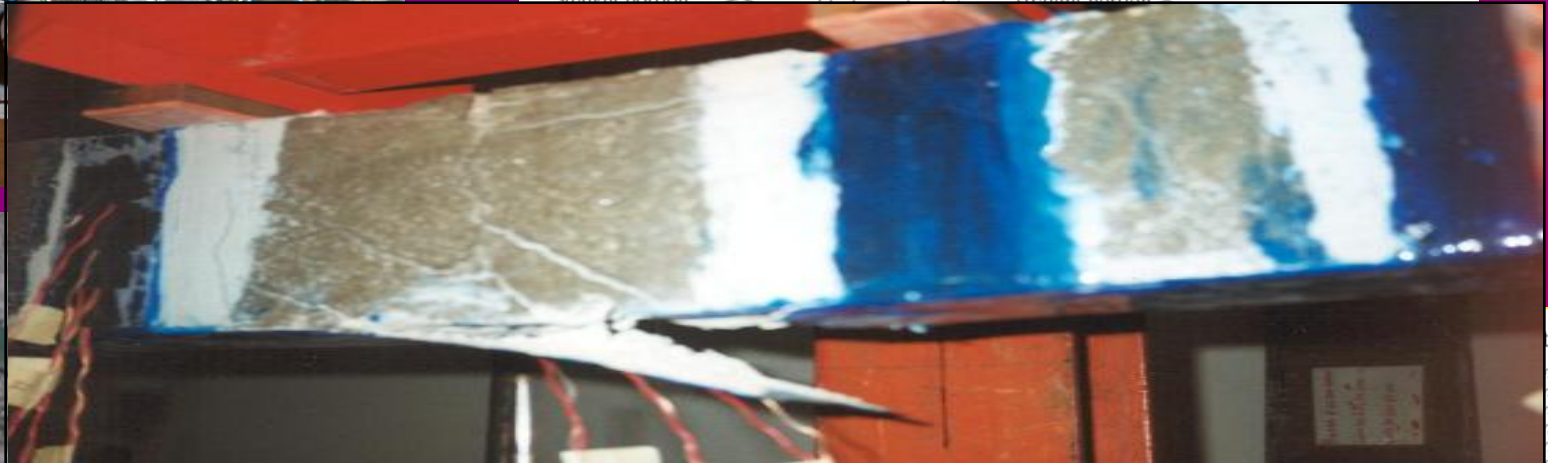
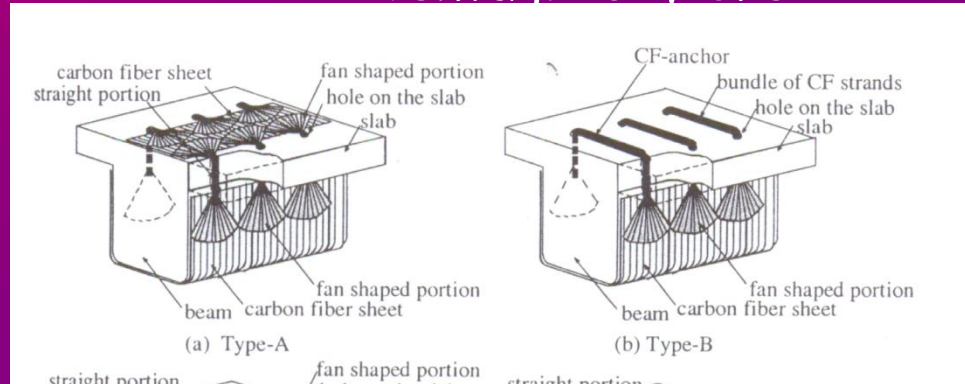
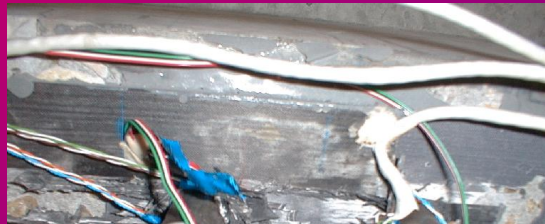
Problema già noto nel C.A.

➤ Se non si procede alla verifica della lunghezza di ancoraggio è possibile utilizzare sistemi tecnologici speciali per l'ancoraggio delle estremità delle lamine

sistemi di ancoraggio (si possono usare certificandone la validità)

- Lamine di acciaio o FRP incollate e/o bullonate all'estremità

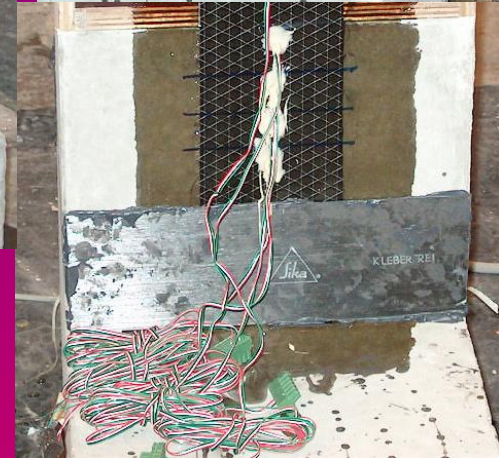
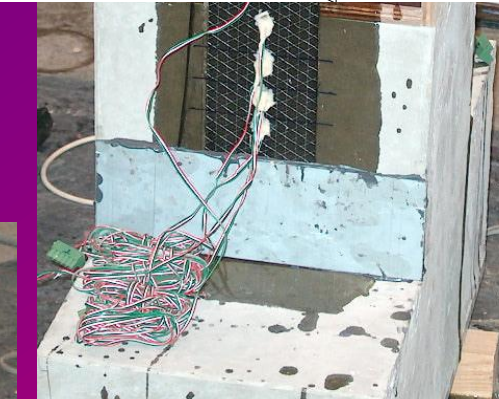
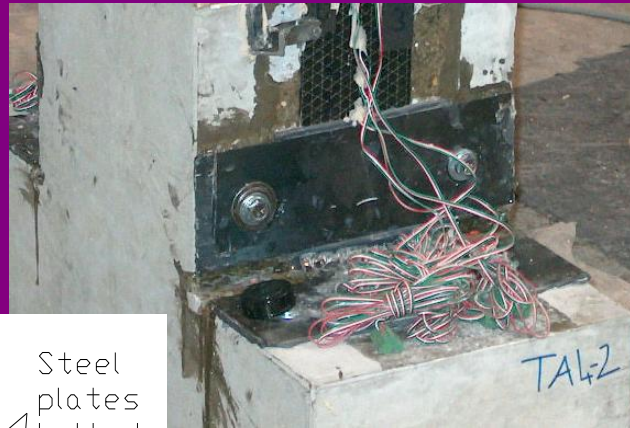
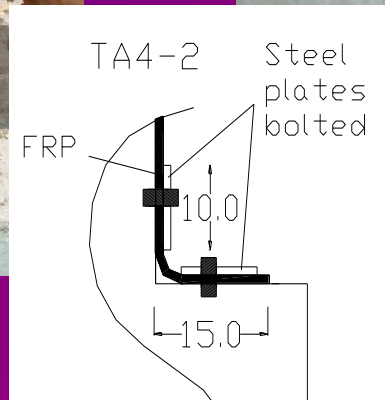
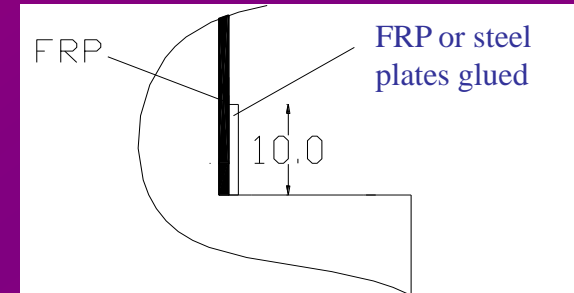
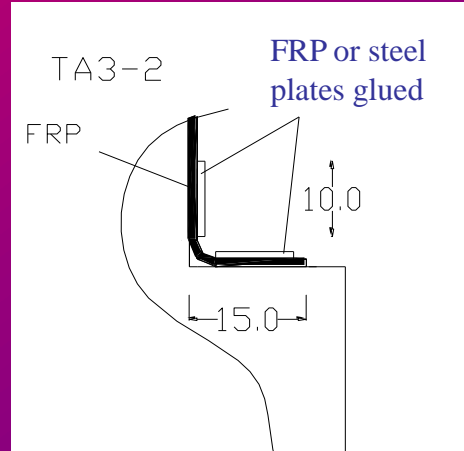
• 'ventagli' di fibre



Near-surface mounted FRP rods/laminates

✓ Prove sperimentali su ancoraggi

piatti in acciaio o FRP incollati o bullonati



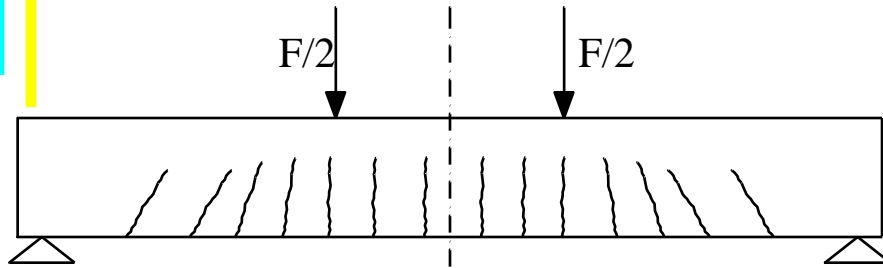
✓ Analisi del comportamento agli stati limite di servizio

- Limitazione delle tensioni allo SLS (§ 4.2.3.2)
- Controllo dell'inflessione sotto i carichi dello SLS (§ 4.2.3.3)
- Controllo della fessurazione (§ 4.2.3.4)
 - **Le verifiche in condizioni di servizio 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 presenza di un carico al momento dell'applicazione della lamina.**
 - **Le tensioni nei materiali sono valutabili per sovrapposizione degli effetti.**
- Le ipotesi alla base del calcolo sono:
 - comportamento elastico lineare dei materiali;
 - conservazione della pianeità delle sezioni rette;
 - assenza di scorrimenti tra calcestruzzo ed armatura metallica e tra calcestruzzo e lamina di rinforzo in FRP: proporzionalità tra la tensione dell'acciaio e della lamina rispetto a quella di una fibra di calcestruzzo posta alla stessa quota attraverso coefficienti di omogeneizzazione
 - i valori dei coefficienti di omogeneizzazione devono essere stabiliti tenendo conto dell'evoluzione della viscosità e quindi facendo riferimento a situazioni sia a breve che a lungo termine

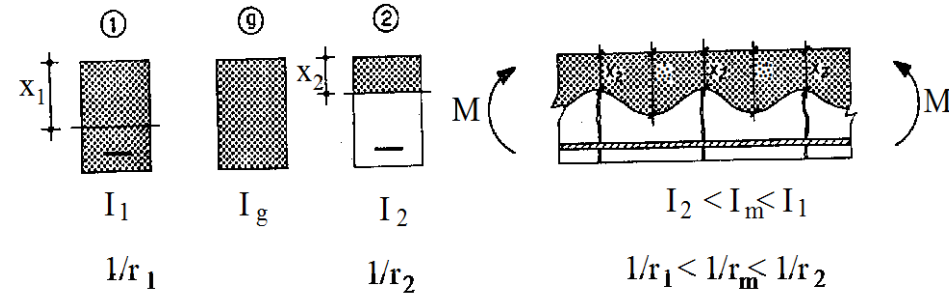
✓ Verifica delle frecce

- Il calcolo della freccia per travi di c.a. rinforzate con FRP può essere effettuato mediante integrazione del diagramma delle curvatures. Queste ultime possono essere valutate attraverso un'analisi non lineare che tenga conto della fessurazione e dell'effetto irrigidente del calcestruzzo teso.
- In alternativa sono possibili analisi semplificate del tipo di quelle in uso per le ordinarie sezioni di c.a., sempre che siano suffragate da adeguate sperimentazioni.
- Il calcolo della freccia può essere effettuato portando in conto l'effetto di *tension stiffening* (effetto irrigidente) del calcestruzzo, utilizzando un approccio tecnico che introduce tale effetto nell'espressione degli spostamenti mediante opportuni coefficienti.
- Le formule per il calcolo delle frecce relative al c.a. si possono ancora utilizzare tenendo conto della presenza del rinforzo esterno nel calcolo delle inerzie.
 - E' possibile utilizzare modellazioni più accurate per il calcolo delle frecce purché siano supportate da adeguate evidenze sperimentali.
 - La presenza di una condizione di carico preesistente all'applicazione del rinforzo può essere introdotta sovrapponendo gli effetti e quindi i contributi delle frecce delle diverse fasi se il calcolo è lineare

stati limite di servizio → deformabilità



trave fessurata

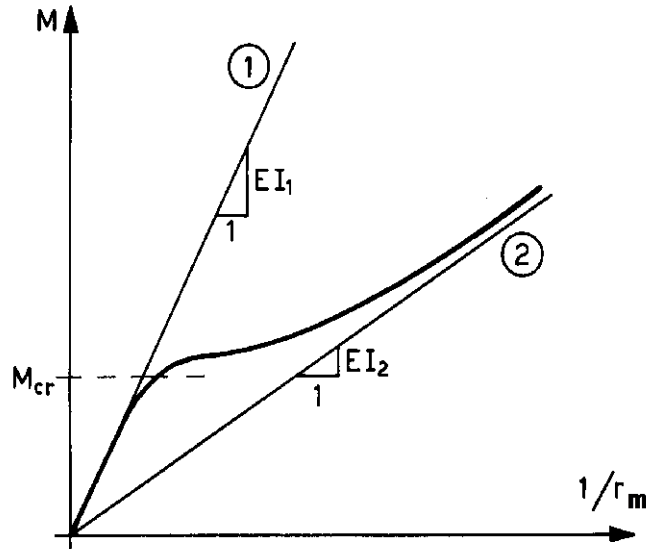


comportamento medio

I_1 - inerzia sezione integra

I_2 - inerzia sezione parzializzata

$1/r$ - curvatura



relazione momento-curvatura media

$$f = f_1 \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^2 + f_2 \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^2 \right]$$

f - freccia

f_1 - freccia stadio I

f_2 - freccia stadio II

M_{cr} - momento di fessurazione

M_{max} - momento massimo

Verifica dell'apertura delle fessure

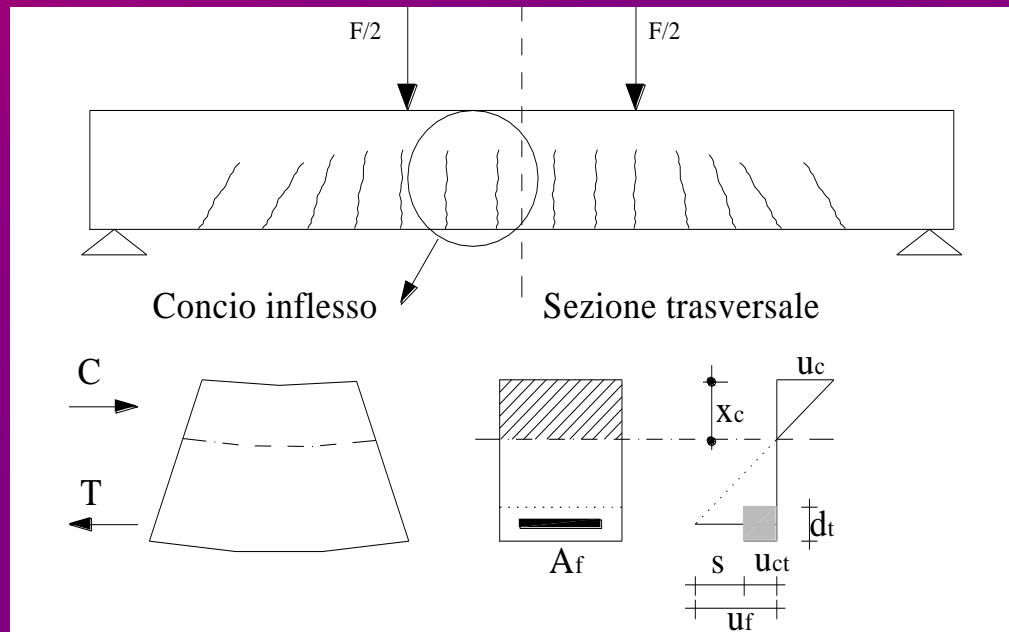
- I fenomeni fessurativi devono essere opportunamente contenuti dal momento che la presenza di fessure troppo numerose o troppo aperte potrebbe ridurre notevolmente la durabilità delle strutture, la loro funzionalità, il loro aspetto e potrebbe danneggiare l'integrità del legame di aderenza all'interfaccia lamina-calcestruzzo.
- I limiti di fessurazione delle strutture rinforzate con FRP devono soddisfare le prescrizioni contenute nella normativa vigente.
- E' possibile utilizzare modellazioni disponibili in letteratura per il calcolo dell'apertura delle fessure purché siano supportate da adeguate evidenze sperimentali

verifica $w < w_k$
 w dipende dal tipo di ambiente

$$w_k = 1.7 w_m$$

w_k apertura caratteristica

$$W_m = S_{rm} \cdot \epsilon_{fm} \quad \text{ampiezza media della fessura}$$



distanza fessure

$$s_{rm} = 50 + 0.25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\phi}{\mu}$$

deformazione media acciaio

$$\epsilon_{fm} = \frac{\sigma_f}{E_f} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{fr}}{\sigma_f} \right)^2 \right]$$

Verifica delle tensioni

- evitare lo snervamento dell'acciaio e mitigare i fenomeni di viscosità nel calcestruzzo e nel rinforzo esterno
- in presenza di un momento M_0 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 nei materiali dal momento complessivo $M = M_0 + M_1$ possono essere valutate per sovrapposizione degli effetti
- per le verifiche delle tensioni nel calcestruzzo e nell'acciaio si fa riferimento alle indicazioni della normativa vigente per il cemento armato.
- limitazione delle tensioni nelle fibre

$$\sigma_f \leq \eta f_{fk}$$

sotto condizioni di carico semi-permanenti

dove f_{fk} è la tensione di rottura caratteristica delle fibre,

il coefficiente η è diversificato in funzione delle fibre e i valori indicativi per CFRP, AFRP e GFRP sono riportati nel capitolo relativo alle basi del progetto di rinforzo.

Verifica delle tensioni

(1)P In condizioni di servizio le tensioni nelle fibre, calcolate per la combinazione di carico quasi permanente, devono soddisfare la limitazione

$$\sigma_f \leq \eta f_{fk}$$

, essendo f_{fk} la tensione caratteristica di rottura delle fibre ed η il fattore di conversione, i cui valori sono suggeriti nel § 3.6.

Le tensioni nel calcestruzzo e nell'acciaio vanno limitate in accordo con quanto prescritto nella Normativa vigente.

(2) In presenza di un momento M_0 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 $M=M_0+M_1$ possono essere valutate in maniera additiva, nel modo seguente:

- tensioni nel calcestruzzo: $\sigma_c = \sigma_{c0} + \sigma_{c1}$, $\sigma_{c0} = M_0 / W_{0,c}^s$, $\sigma_{c1} = M_1 / W_{1,c}^s$;
- tensioni nell'acciaio teso: $\sigma_s = \sigma_{s0} + \sigma_{s1}$, $\sigma_{s0} = n_s M_0 / W_{0,s}^i$, $\sigma_{s1} = n_s M_1 / W_{1,s}^i$;
- tensioni nelle fibre: $\sigma_f = n_f M_1 / W_{1,f}^i$.

Nelle relazioni sopra riportate, con riferimento alla Figura 4-10, i moduli di resistenza sono così definiti:

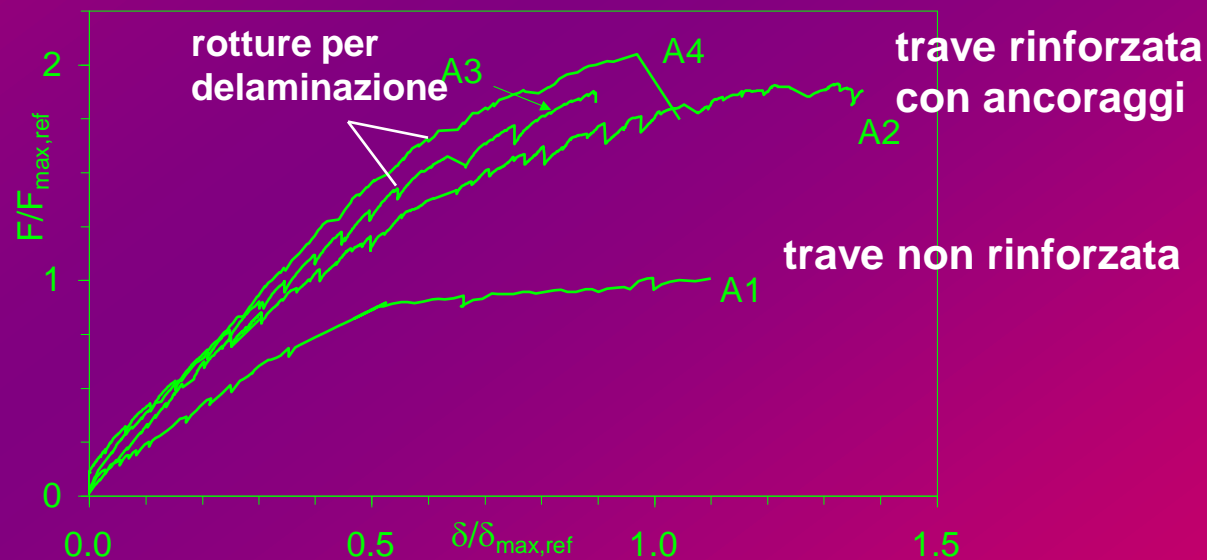
- $W_{0,c}^s = I_0 / x_0$: modulo di resistenza della sezione in c.a. relativo al lembo di calcestruzzo più compresso;
- $W_{0,s}^i = I_0 / (d - x_0)$: modulo di resistenza della sezione in c.a. relativo all'acciaio in trazione;
- $W_{1,c}^s = I_1 / x_1$: modulo di resistenza della sezione in c.a. rinforzata relativo al lembo di calcestruzzo più compresso;
- $W_{1,s}^i = I_1 / (d - x_1)$: modulo di resistenza della sezione in c.a. rinforzata relativo all'acciaio in trazione;
- $W_{1,f}^i = I_1 / (H - x_1)$: modulo di resistenza della sezione in c.a. rinforzata relativo alle fibre.

Inoltre, per quanto riguarda le caratteristiche geometriche della sezione retta e la posizione dell'asse neutro, nell'ipotesi che il momento M_0 induca fessurazione nella sezione, i momenti di inerzia I_0 e I_1 e le distanze x_0 e x_1 degli assi neutri dall'estremo lembo compresso sono relativi, rispettivamente, alla condizione di sezione in c.a. fessurata e non rinforzata, e di sezione in c.a. fessurata e rinforzata con FRP.

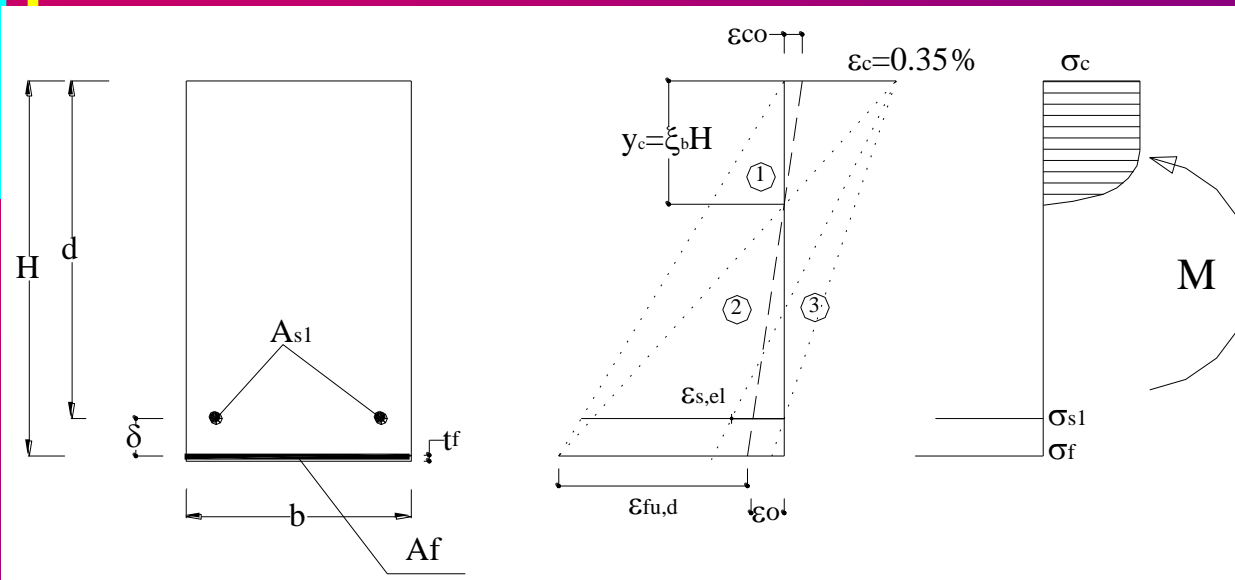
Anche in questo caso i coefficienti di omogeneizzazione utilizzati devono tenere conto della viscosità del calcestruzzo e quindi della distinzione tra verifiche a breve ed a lungo termine.

✓ Duttilità

- capacità di deformazione in campo plastico: dipende sia dal comportamento della sezione, sia dalle modalità effettive di collasso dell'elemento.
- Per la sezione si ottiene un comportamento più duttile quando il collasso avviene per rottura a compressione del calcestruzzo.
- Il superamento della resistenza a trazione della lamina comporta una modalità di rottura di tipo fragile.
- La duttilità è influenzata dalla modalità di rottura dell'elemento nel suo complesso, indipendentemente dal tipo di sezione, ed è decisamente inferiore quando si verifica la delaminazione.



1) Sezione in c.a. rinforzata con 2 strati di CFRP



Calcolo della massima tensione nella lamina

- spessore FRP: $2 \times 0.0164\text{cm}$; larghezza FRP: 30cm ;
- tensione caratteristica di rottura: $f_{f,uk} = 4900\text{MPa}$
- modulo elastico: $E_f = 240000\text{MPa}$, $\epsilon_{f,uk} = 0.0204$

$$\epsilon_{fd} = \min \left(\eta_a \frac{\epsilon_{fu}}{\gamma_f}, \epsilon_{f,max} \right)$$

$$\epsilon_{fd} = \min (0.0155, \epsilon_{f,max})$$

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	Fattore di conversione ambientale, η_a
Esposizione interna	Carbonio / Epossidica	0.95
	Vetro / Epossidica	0.75
Esposizione esterna (ponti, colonne e parcheggi)	Carbonio / Epossidica	0.75
	Vetro / Epossidica	0.75
Ambiente aggressivo (centrali chimiche e centrali di trattamento delle acque)	Carbonio / Epossidica	0.75
	Vetro / Epossidica	0.75

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

⁽¹⁾ Applicazione di sistemi di rinforzo prefabbricati in condizione di controllo di qualità ordinario; applicazione di tessuti a mano in cui siano stati presi tutti i necessari accorgimenti per conseguire un elevato controllo di qualità sulle condizioni e sul processo di applicazione.
⁽²⁾ Applicazione di tessuti a mano in condizione di controllo di qualità ordinario; applicazione di qualsiasi sistema di rinforzo in condizioni di difficoltà ambientale o operativa.

2) Sezione in c.a. rinforzata con 2 strati di CFRP

Calcolo della deformazione massima nella lamina per delaminazione intermedia

$$\varepsilon_{f,\max} = k_{cr} \cdot \frac{f_{fdd}}{E_f}$$

Massima tensione per crisi per delaminazione di estremità

3

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f/b}{1 + b_f/b_o}} = \sqrt{\frac{2 - 300/300}{1 + 300/400}} = 0.76$$

Si assume $k_b=1$

$$f_{ck} = 0.83 R_{ck} = 0.83 \cdot 25 = 20.7 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3} = 2.3 \text{ MPa}$$

$$\Gamma_{Fk} = 0.03 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}} = 0.03 \cdot 1 \cdot \sqrt{20.7 \cdot 2.26} = 0.206$$

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fk}}{t_f}} = \frac{1}{1.5 \cdot \sqrt{1.6}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 240000 \cdot 0.206}{2 \cdot 0.164}} = 289 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{f,\max} = k_{cr} \cdot \frac{f_{fdd}}{E_f} = 3 \cdot \frac{289}{240000} = 0.0036$$

La deformazione massima da assumere nel progetto è quindi pari a 0.0036

3) Sezione in c.a. rinforzata con 2 strati di CFRP

Calcolo del momento ultimo

$$0 = 0.8 \cdot b \cdot y_c \cdot f_{cd} - A_{s1} \cdot f_{yd} - A_f \cdot \varepsilon_f \cdot E_f \quad \text{Equilibrio traslazione}$$

Ipotizzando che la zona di rottura sia la 1 e che la lamina sia alla deformazione ultima: $\varepsilon_f = \varepsilon_{fu} = 0.0036$

$$0 = 0.8 \cdot 30 \cdot y_c \cdot 110 - 7.63 \cdot 3826 - 0.984 \cdot 0.0036 \cdot 2400000 \quad \longrightarrow \quad y_c = 14.3 \text{ cm}$$

le deformazioni nel calcestruzzo e l'acciaio teso si calcolano:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{fu} \cdot \frac{y_c}{(H - y_c)} = 0.0036 \cdot \frac{14.3}{(50 - 14.3)} = 0.0014 < 0.0035$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{fu} \cdot \frac{d - y_c}{(H - y_c)} = 0.0036 \cdot \frac{46 - 14.3}{(50 - 14.3)} = 0.0032 > \varepsilon_{sy}$$

$$M_u = \psi \cdot b \cdot y_c \cdot f_{cd} \cdot (d - \lambda \cdot y_c) + A_{s2} \cdot \varepsilon_{s2} \cdot E_s \cdot (d - d_2) - A_f \cdot \varepsilon_f \cdot E_f \cdot d_1$$

$$M_u = 0.8 \cdot 30 \cdot 14.3 \cdot 110 \cdot (46 - 0.416 \cdot 14.3) - 0.984 \cdot 0.0036 \cdot 2400000 \cdot 4 = 15.5 \text{ tm}$$

+25 %

4) Verifica dell'ancoraggio per rinforzo con due strati di CFRP

- Calcolo della lunghezza di trasferimento

$$L_{t,\max} = \sqrt{E_f t_f / (f_{ctm} \cdot c_2)} = \sqrt{240000 \cdot 2 \cdot 0.164 / (2.3 \cdot 2)} = 132\text{mm}$$

- Coefficiente di forma

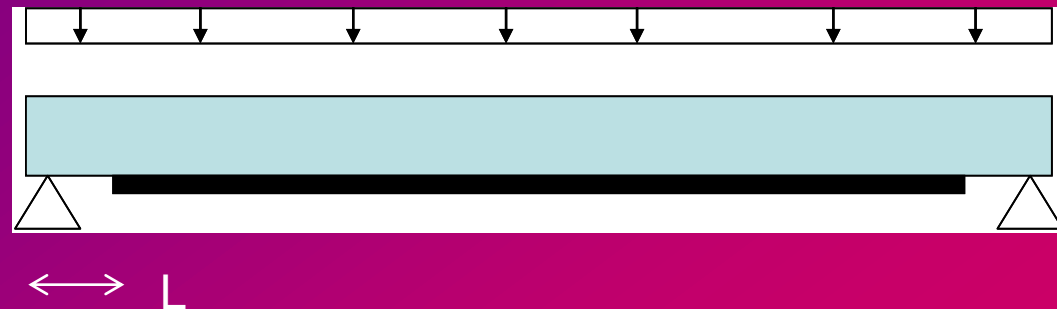
$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f / b}{1 + b_f / b_o}} = \sqrt{\frac{2 - 300 / 300}{1 + 300 / 400}} = 0.76 < 1$$

- Tensione di delaminazione

$$f_{\text{fdd}} = \frac{1}{\gamma_{f,d} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{\text{Fk}}}{t_f}} = \frac{1}{1.5 \cdot \sqrt{1.6}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 240000 \cdot 0.206}{2 \cdot 0.164}} = 289\text{MPa}$$

Per calcolare la distanza dall'appoggio, x_{\max} , dove la lamina può terminare si uguaglia la tensione di delaminazione alla tensione corrispondente al momento agente nella sezione x_{\max} , calcolata con la formula di Navier

$$\sigma_{f,\max} = \frac{n_f \cdot (H - y_c) \cdot M}{I_2} = 289\text{MPa}$$



$$\sigma_{f,max} = \frac{n_f \cdot (H - y_c) \cdot M}{I_2} = 289 \text{ MPa}$$

$$\rightarrow M = 83 \text{ kN m}$$

Inerzia della sezione fessurata rinforzata = $I_2 = 1.63 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$

Coefficiente di omogeneizzazione lamina-cla: $n_f = E_s / E_c = 2 \times 240000 / 28460 = 17$

- Il momento nella sezione a distanza x_{max} dipende dallo schema di carico: in ipotesi di trave appoggiata – appoggiata con carico distribuito $q = 34 \text{ kN/m}$ e lunghezza $L = 6 \text{ m}$, si ottiene

$$M(x_{max}) = -\frac{qx_{max}^2}{2} + \frac{ql}{2}x_{max} = 83 \text{ kNm}$$

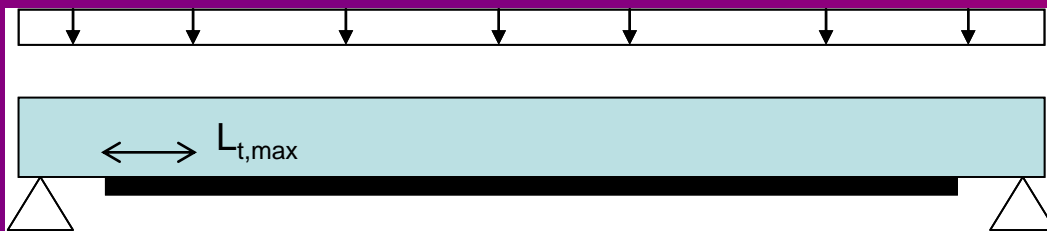
$$\rightarrow x_{max} = 0.972 \text{ m}$$

$$M_{max} = \frac{q \cdot l^2}{8} = 153 \text{ kNm} = 15.3 \text{ tm}$$

$$x_{max} = L + L_{t,max} = 0.972 \text{ m}$$

= momento ultimo sezione rinforzata

$$0.972 = L + 0.132 \text{ m}$$



Distanza di ancoraggio:
 $L = 0.84 \text{ m}$

$$\longleftrightarrow L$$