



Università degli Studi di Roma La Sapienza  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica

# Il confinamento con FRP

(secondo il DT 200/04 del CNR)

**Giorgio Monti**  
monti@uniroma1.it

# Argomenti

- Metodi di confinamento
- Campi di applicazione
- Comportamento del CLS confinato con FRP
- Studi sperimentali
- Studi rivolti alla progettazione

# Metodi di Confinamento

- Incamicciature con gusci prefabbricati
- Posa in opera manuale di tessuti preimpregnati
- Avvolgimento automatico

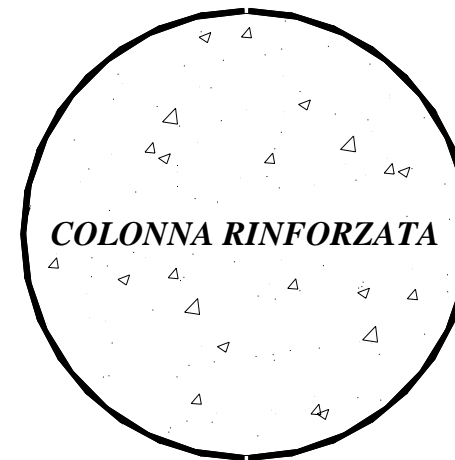


# Metodi di Confinamento

- Incamiciature con gusci prefabbricati
  - Coppie di gusci semicircolari
  - Coppie di gusci semirettangolari
  - Gusci interi aperti
  - Gusci su sezioni rettangolari ovalizzate



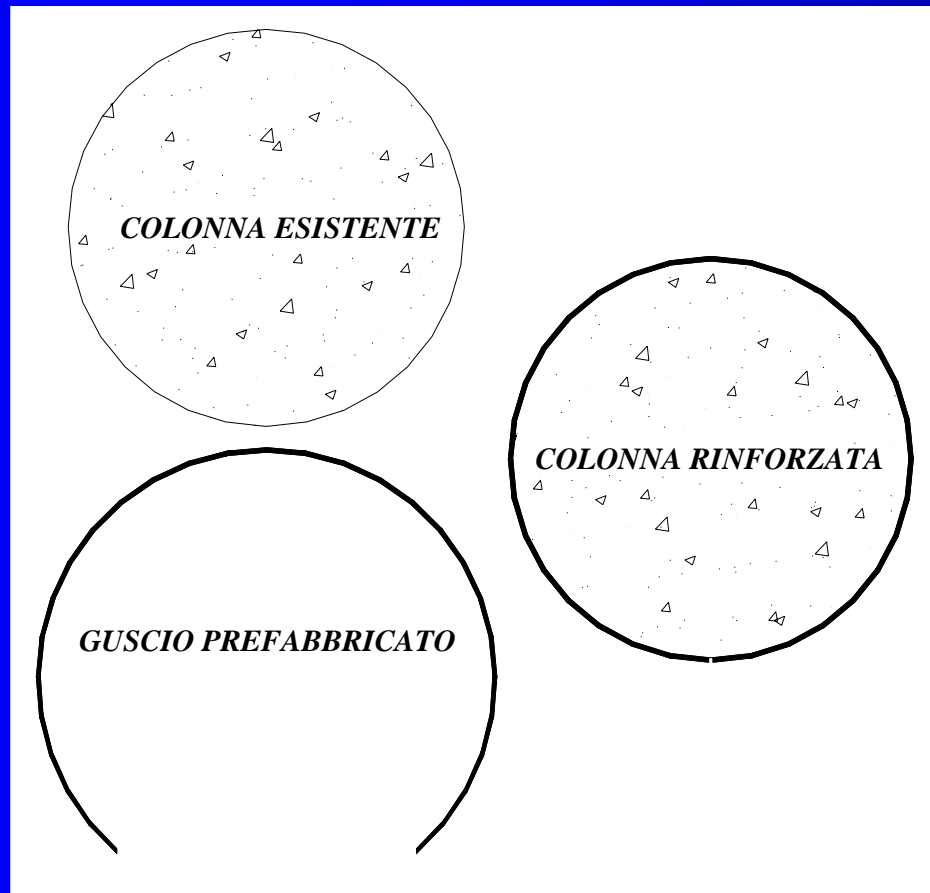
# Coppie di gusci semicircolari



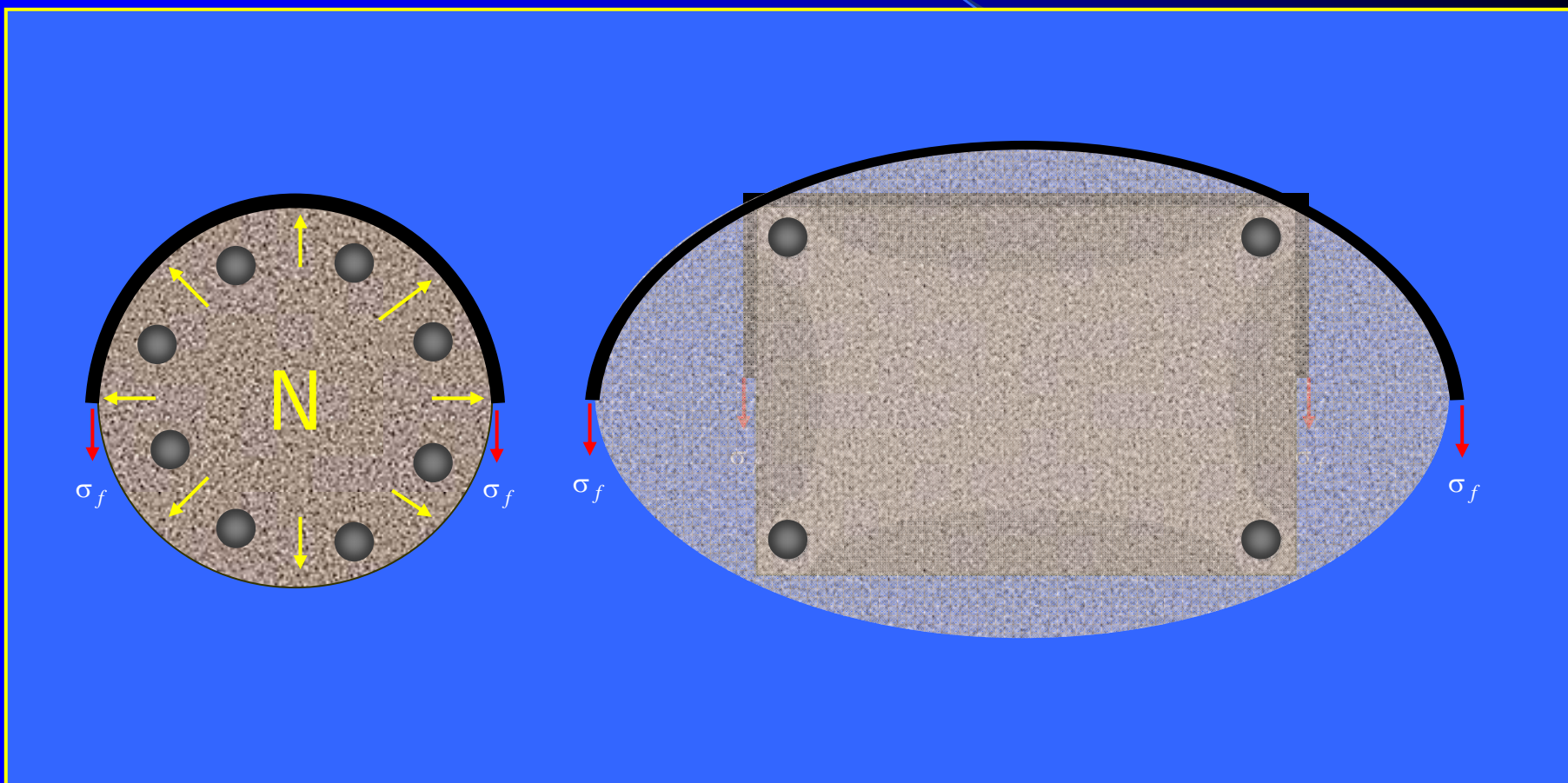
# Coppie di gusci semirettangolari



## Gusci interi aperti



# Gusci su sezioni rettangolari ovalizzate





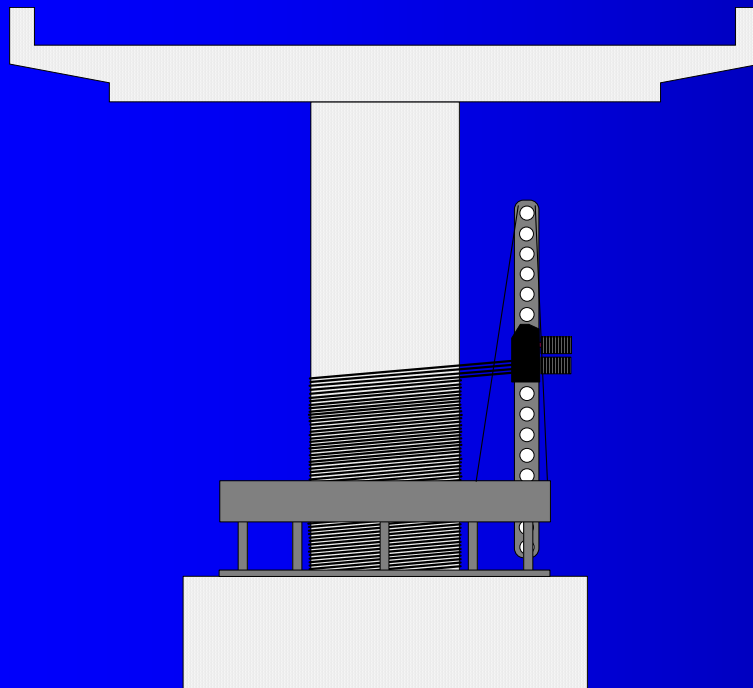
# Metodi di Confinamento

- Posa in opera manuale di tessuti preimpregnati



# Metodi di Confinamento

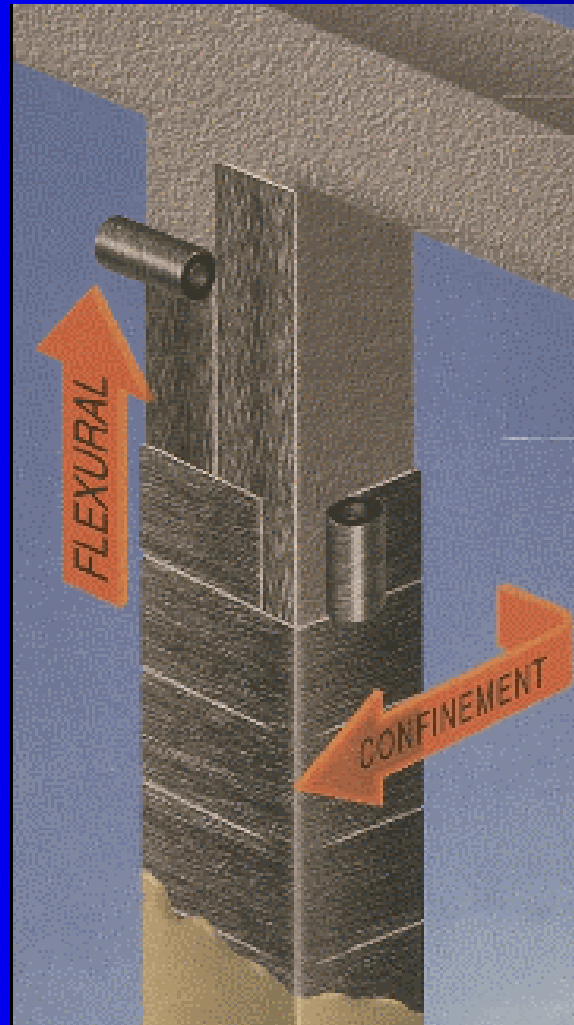
- Avvolgimento automatico



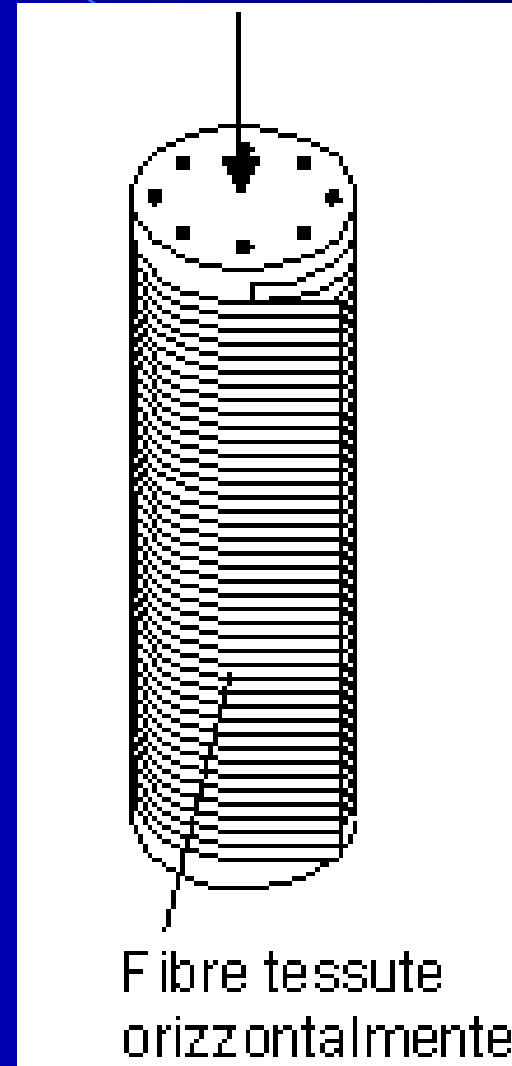
# Campi di Applicazione

- Aumento della **resistenza** a compressione nelle strutture convenzionali
- Aumento della **duttilità** di strutture in zona sismica
- Sia per gli edifici che per le pile dei ponti

# Edifici in cemento armato



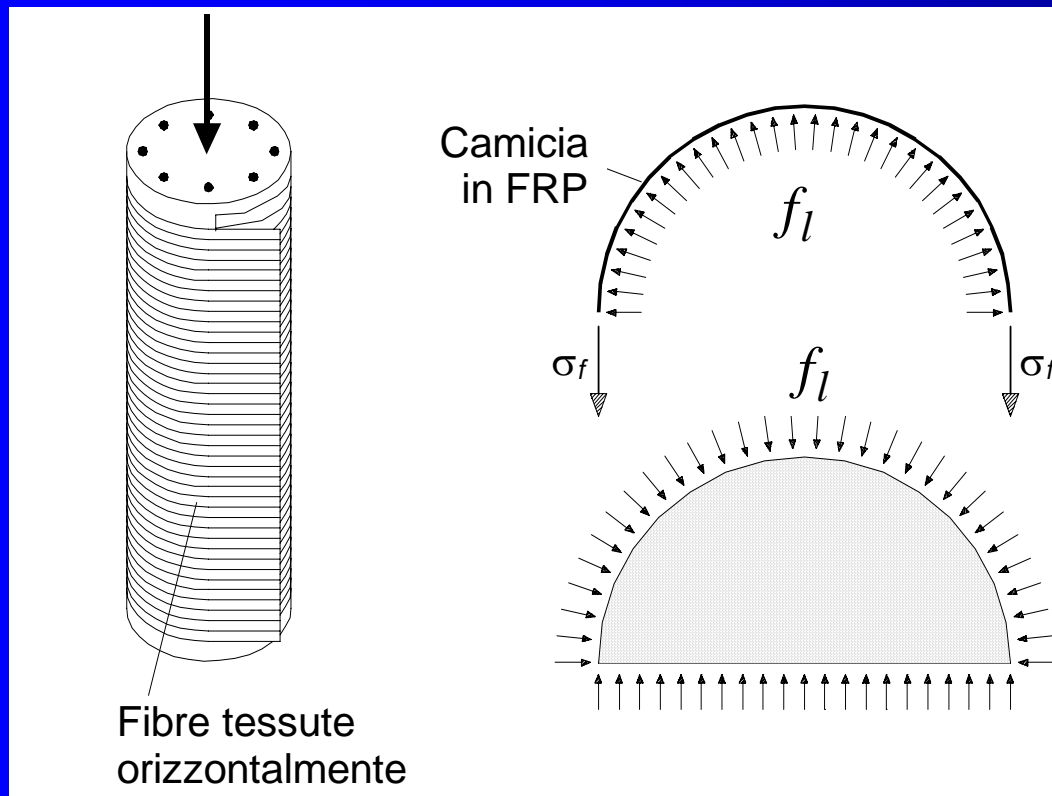
## Pile da ponte



## Rinforzo di strutture in zona sismica



# Comportamento del CLS confinato con FRP



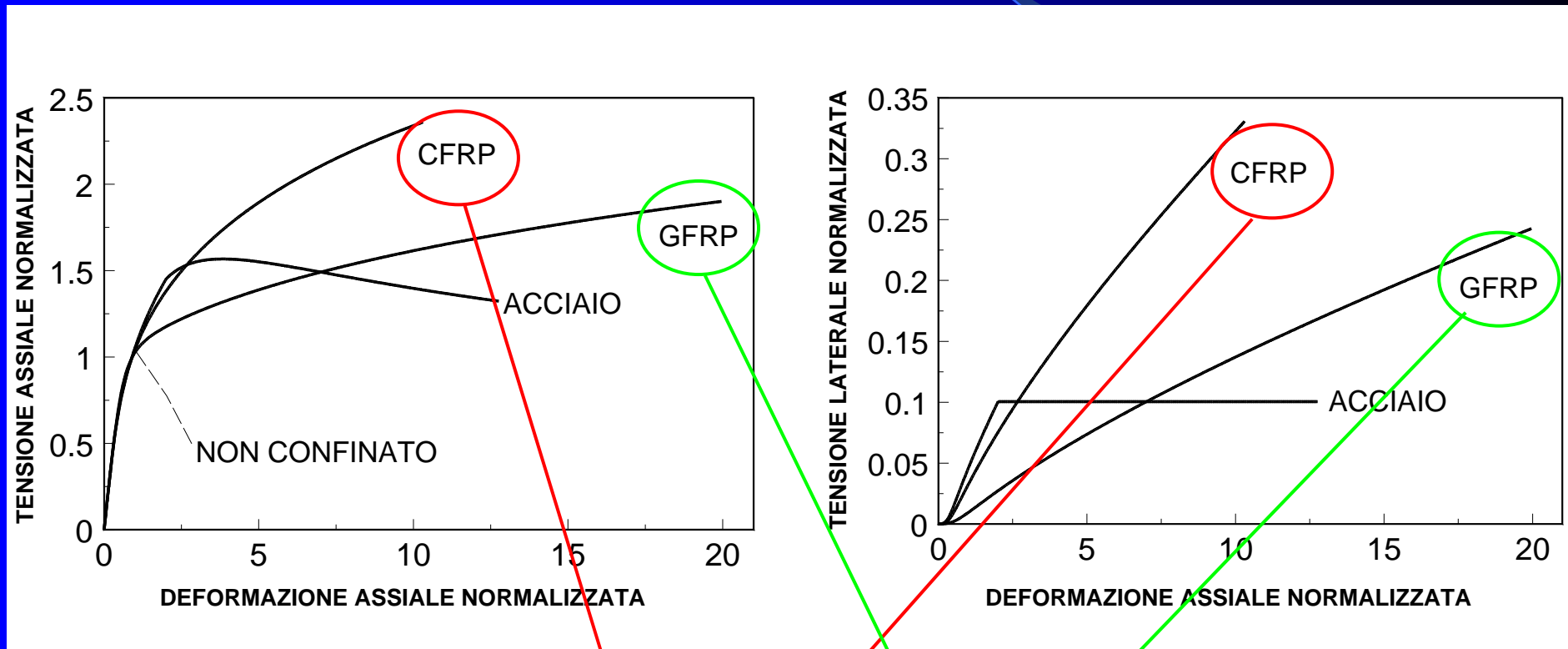
Acciaio

$$f_l = \frac{1}{2} k_e \rho_{st} f_y \quad \rho_{st} = \frac{4 A_{st}}{s d_s}$$

FRP

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_f E_f \varepsilon_f \quad \rho_f = \frac{4 t_f}{D}$$

# Comportamento del CLS confinato con FRP



Più resistenza Più duttilità





# Studi Sperimentali

- Test sperimentali
  - provini di calcestruzzo confinati con FRP (“La Sapienza” – Roma Tre, 2002)
- ... e loro modellazione
  - prove monotone
  - prove cicliche

# Test sperimentali

- Applicazione dell'FRP



# Test sperimentali

- Geometrie considerate

# Test sperimentali

- Strumentazione di prova



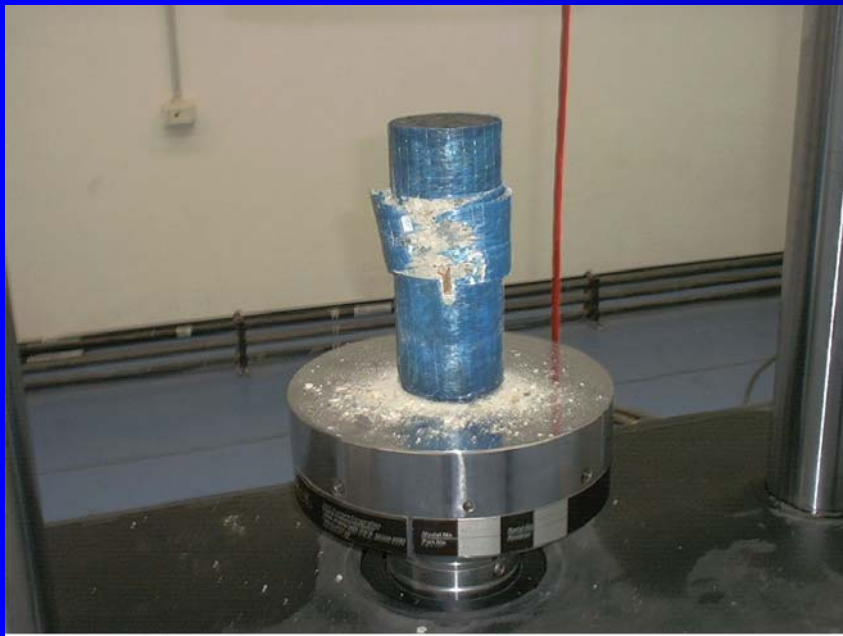
# Test sperimentali

- Esito delle prove



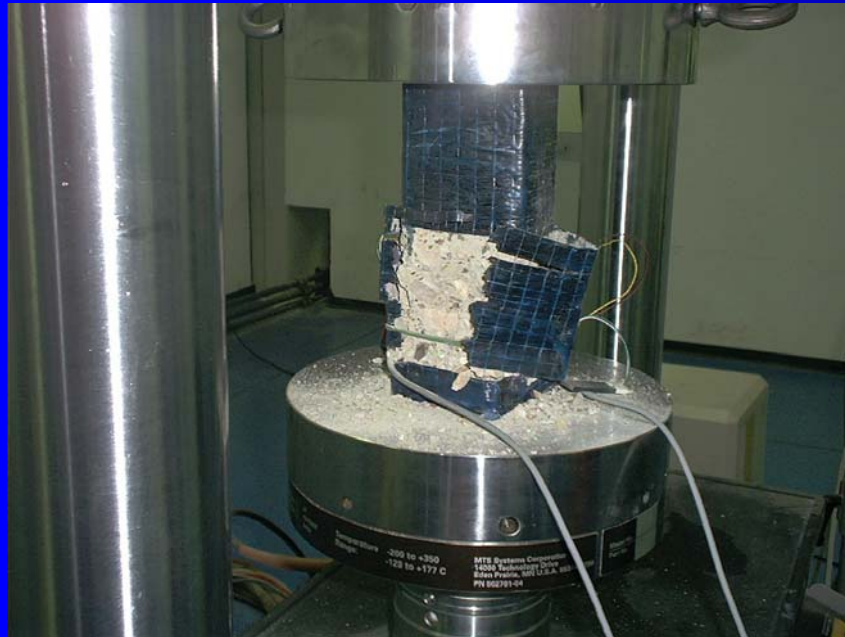
# Test sperimentali

- Esito delle prove



# Test sperimentali

- Esito delle prove



# Test sperimentali

- Esito delle prove (*Play!*)





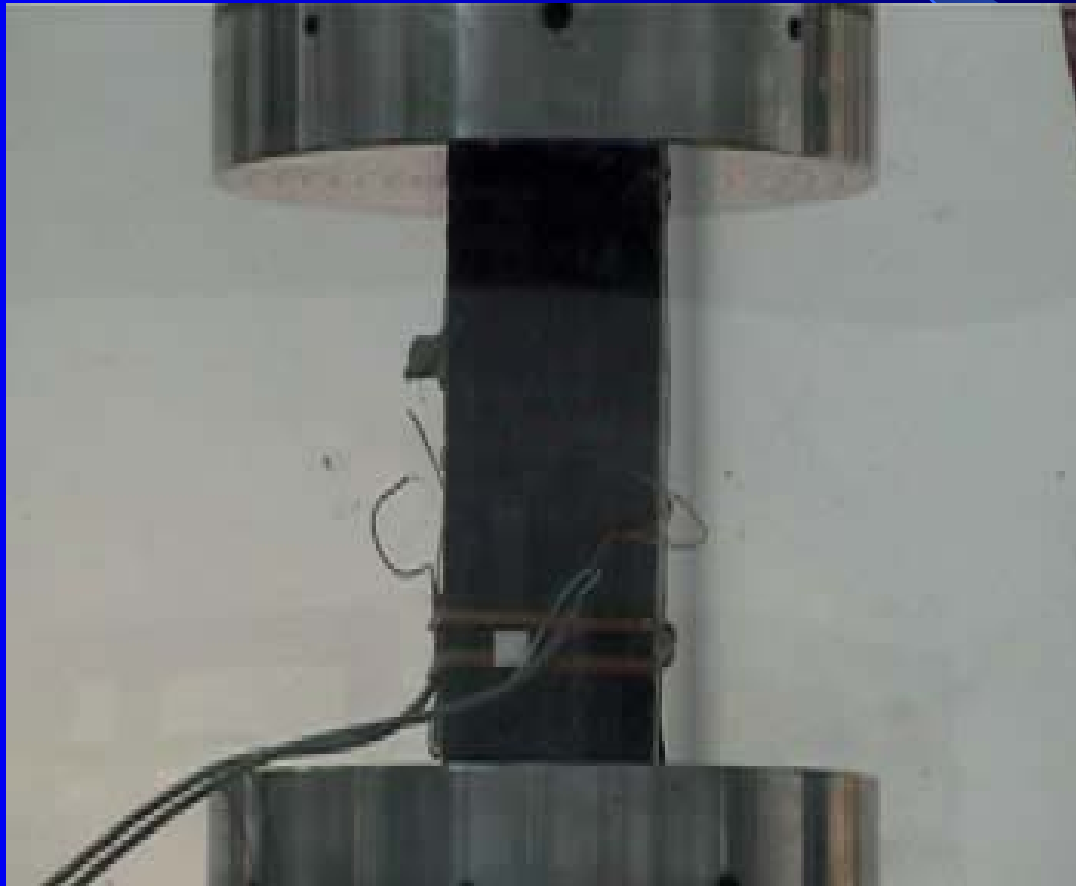
# Test sperimentali

- Esito delle prove (*Play!*)



# Test sperimentali

- Esito delle prove (*Play!*)



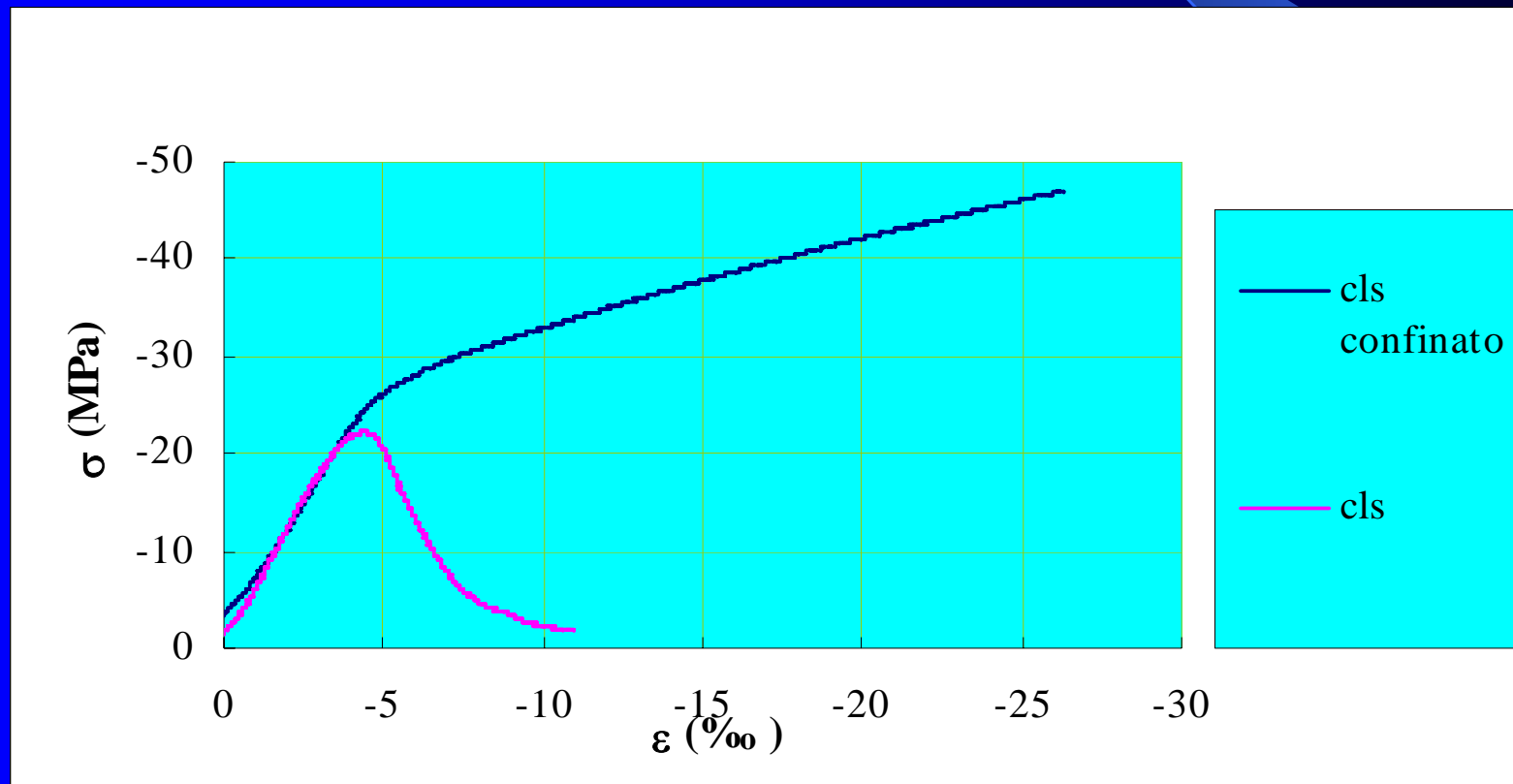
# Test sperimentali

- Esito delle prove (*Play!*)



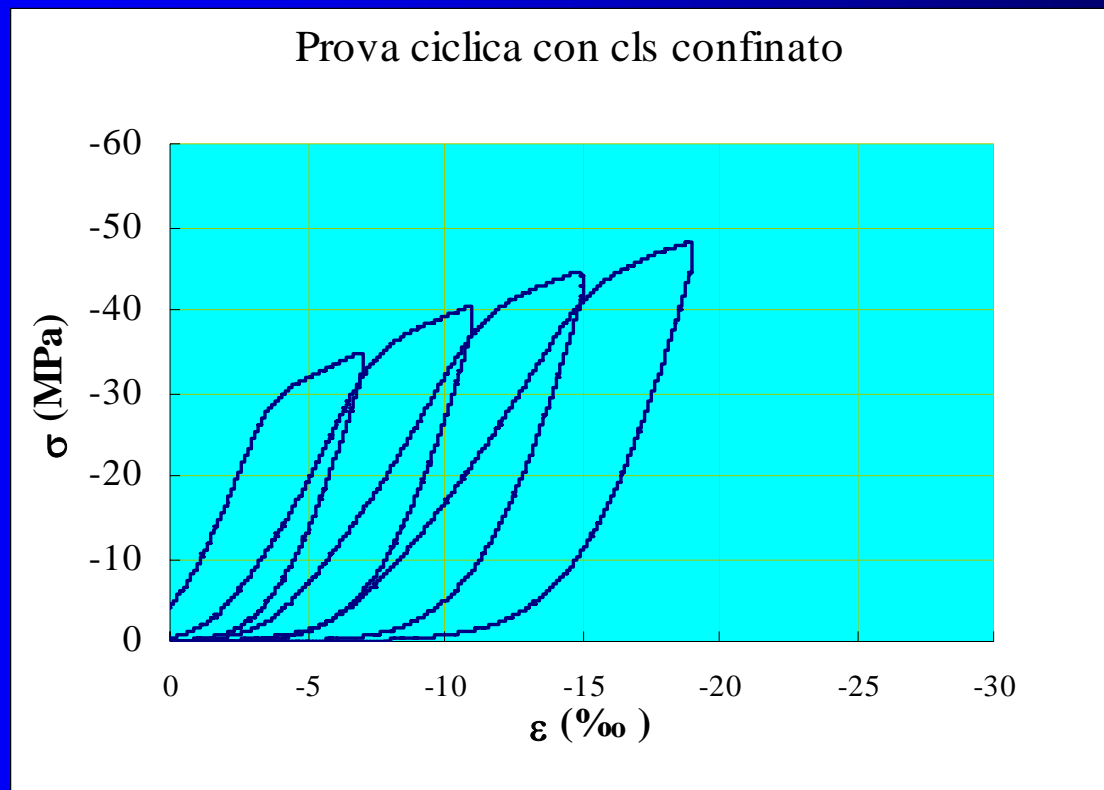
# Test sperimentali

- Risultati prova monotona su provino cilindrico confinato con GFRP



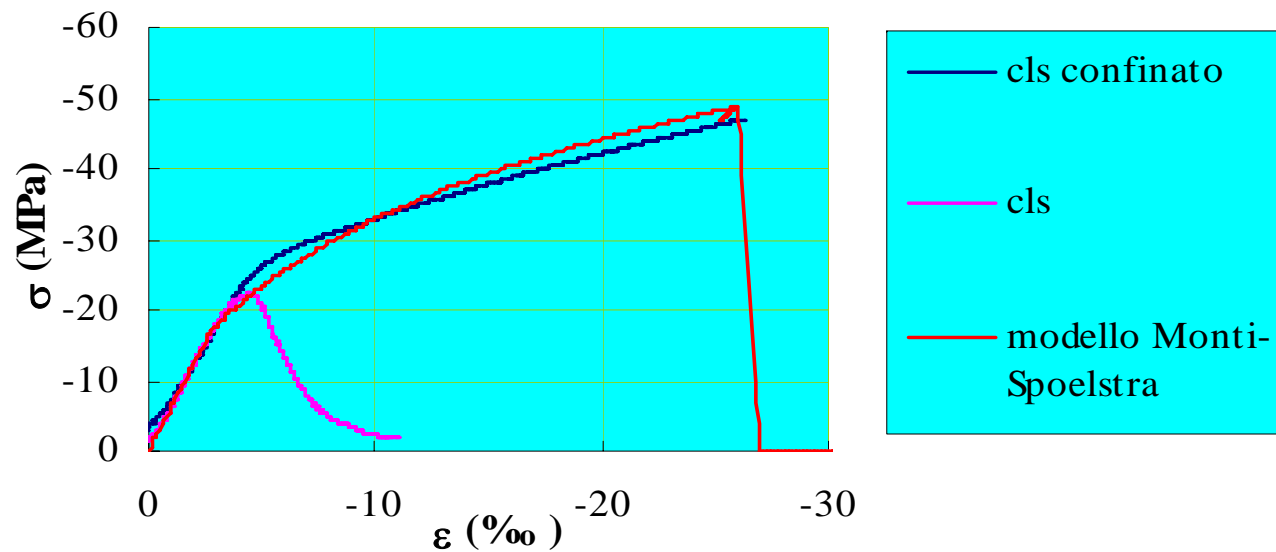
# Test sperimentali

- Risultati prova ciclica su provino cilindrico confinato con GFRP



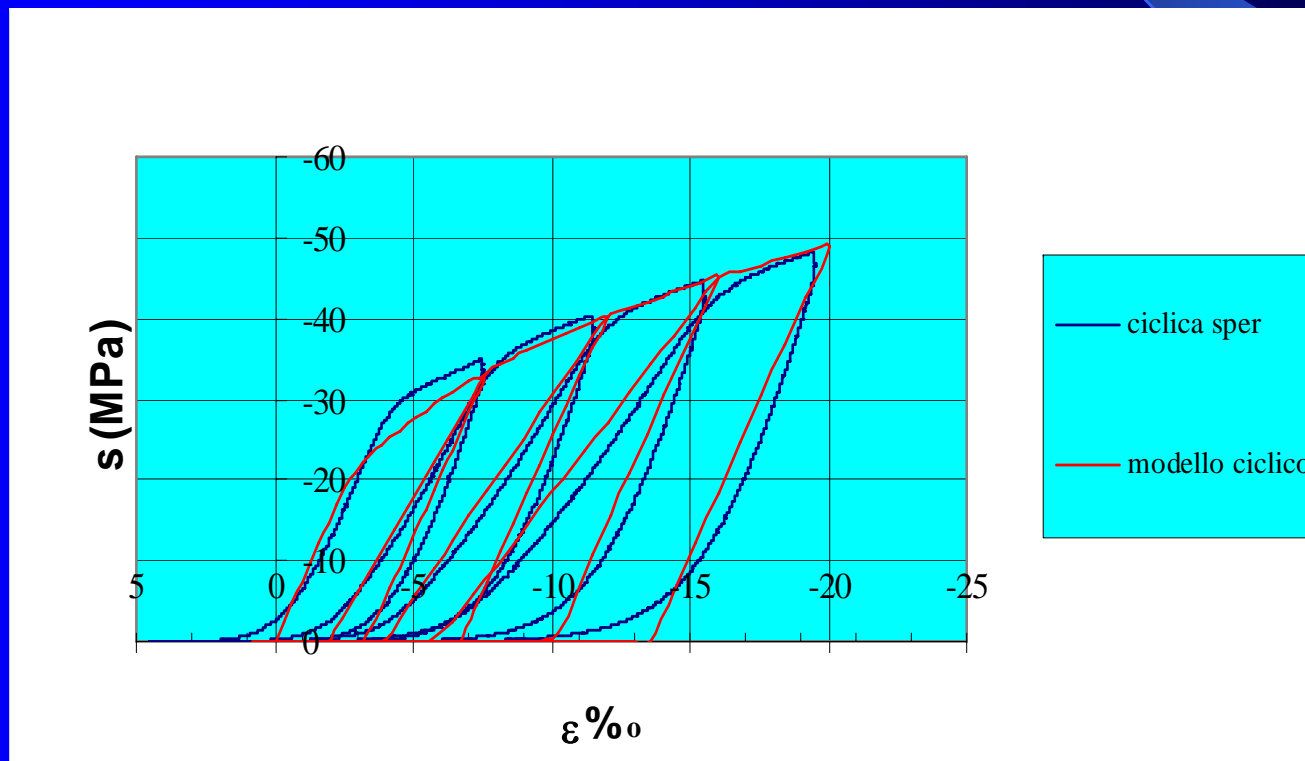
# Confronto test-modello

- Prova monotona su provino cilindrico confinato con GFRP



# Confronto test-modello

- Prova ciclica su provino cilindrico confinato con GFRP



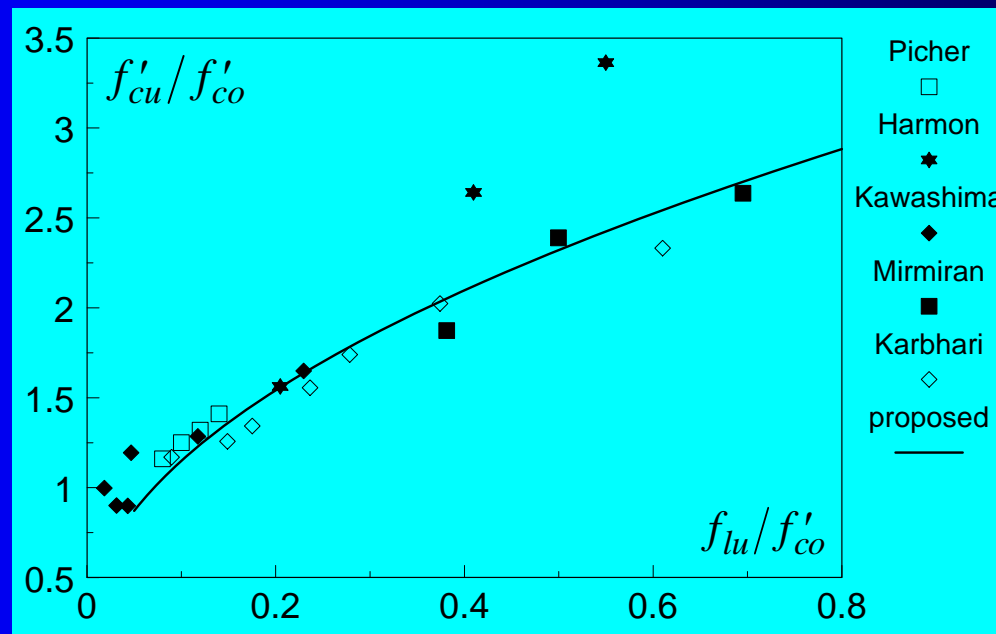
# Studi rivolti alla progettazione

- Equazioni di progetto  
(resistenza e deformazione ultima del cls)
- Effetti di forma e confinamento discontinuo
- Rinforzo di elementi strutturali



# Equazione di progetto per la resistenza

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



# Pressione efficace di confinamento

- La resistenza di un elemento confinato con FRP dipende soltanto da un'aliquota della pressione di confinamento,  $f_1$ , esercitata dal sistema, detta pressione efficace di confinamento,  $f_{1,eff}$

$$f_{1,eff} = k_{eff} \cdot f_1$$

# Pressione efficace di confinamento

- La **pressione di confinamento** può essere valutata mediante la relazione

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

- $\varepsilon_{fd,rid}$  è un'opportuna deformazione ridotta di calcolo dell'FRP

# Pressione efficace di confinamento

- Per sezioni rettangolari la percentuale geometrica di rinforzo in FRP è:

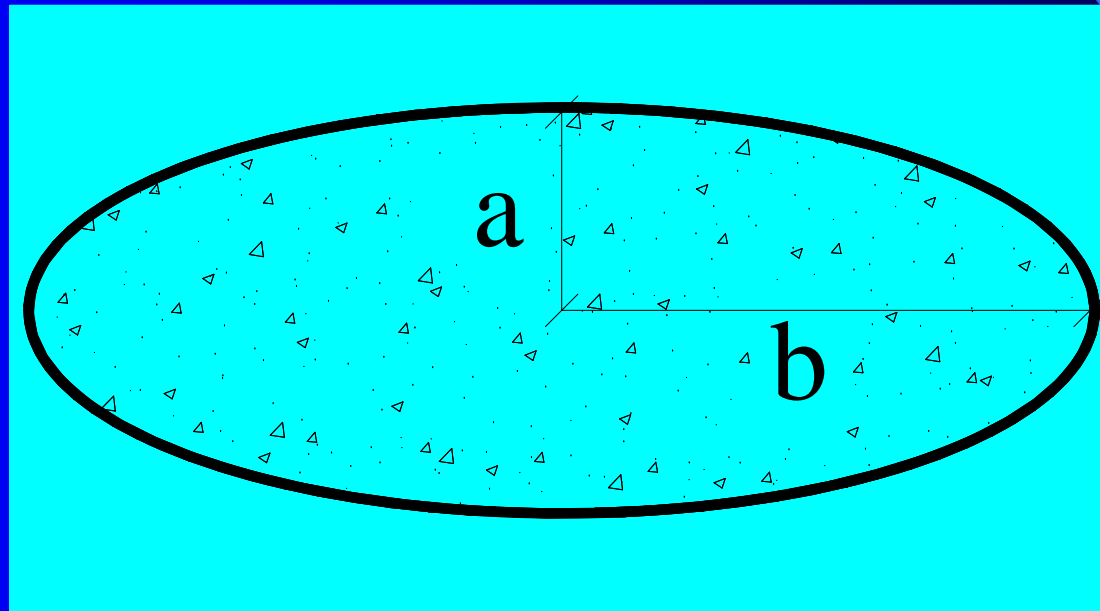
$$\rho_f = \frac{2(b+d)t_f}{b \cdot d}$$

- Per sezioni circolari la percentuale geometrica di rinforzo in FRP è:

$$\rho_f = \frac{4t_f}{D}$$

# Sezioni di forma ellittica

$$\rho_f = \frac{2(a+b-\sqrt{ab})t_f}{ab}$$



# Pressione efficace di confinamento

- La pressione efficace è calcolata utilizzando una **deformazione ridotta** di calcolo dell'FRP:

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

- Il collasso dell'elemento confinato è convenzionalmente assunto in corrispondenza ad una deformazione limite delle fibre pari a **0.004**
- Oltre questo valore, l'elemento confinato con FRP è come un recipiente dalle pareti sottili pieno di materiale incoerente

# Pressione efficace di confinamento

- Il **coefficiente di efficienza** può essere espresso dal prodotto di:
  - coefficiente di efficienza orizzontale,  $k_H$
  - coefficiente di efficienza verticale,  $k_V$
  - coefficiente di inclinazione delle fibre,  $k_\alpha$

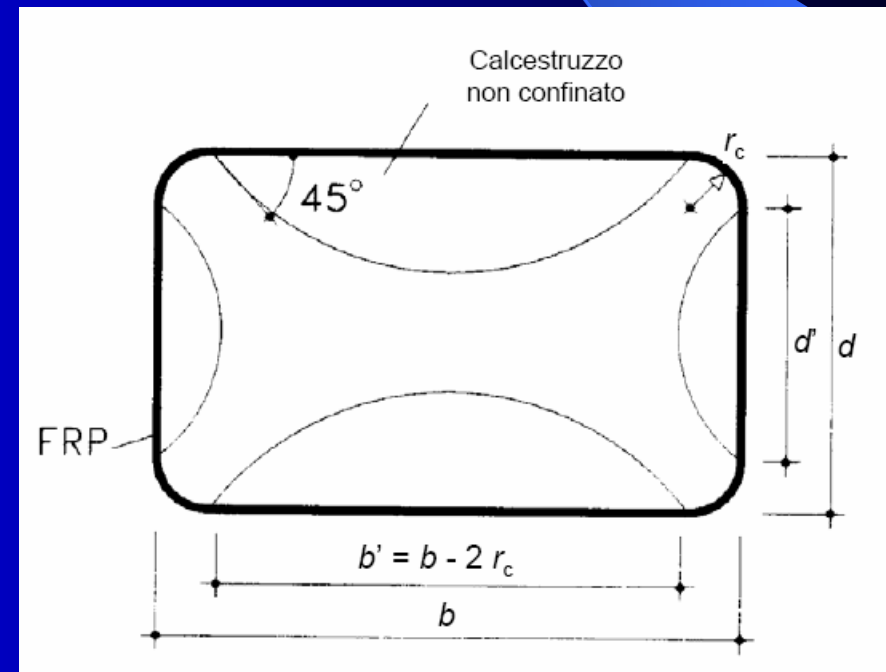
$$k_{\text{eff}} = k_H \cdot k_V \cdot k_\alpha$$

# Pressione efficace di confinamento

- Il coefficiente di efficienza orizzontale  $k_H$  si usa se la sezione è rettangolare (se è circolare  $k_H = 1$ )

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

$$r_c \geq 20 \text{ mm}$$

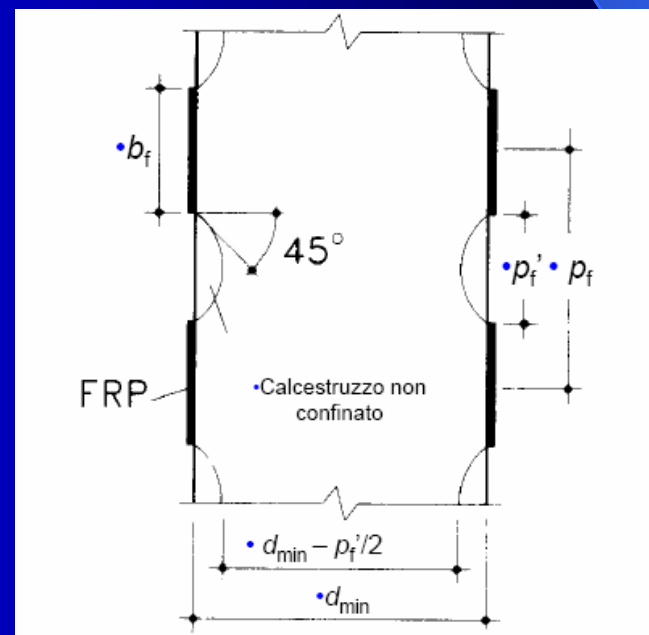




# Pressione efficace di confinamento

- Il coefficiente di efficienza verticale  $k_v$  dipende dalla modalità di applicazione del confinamento lungo l'elemento

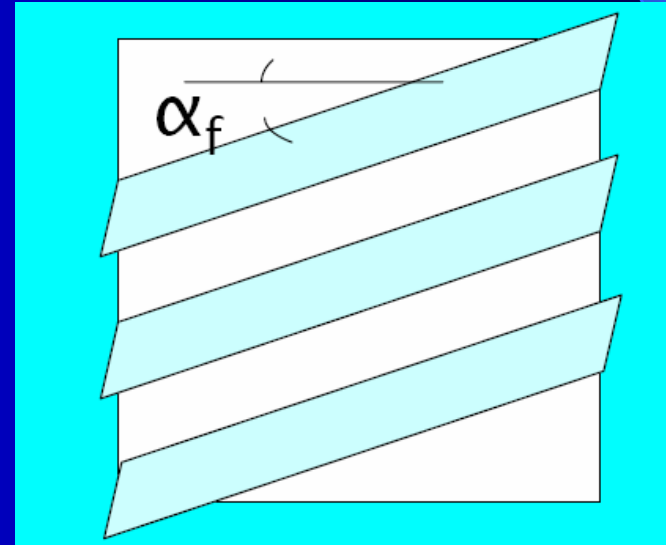
$$k_v = \left( 1 - \frac{p'_f}{2d_{\min}} \right)^2$$



# Pressione efficace di confinamento

- Il coefficiente di inclinazione delle fibre  $k_\alpha$  si impiega quando le fibre vengono disposte ad elica, con inclinazione  $\alpha_f$

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

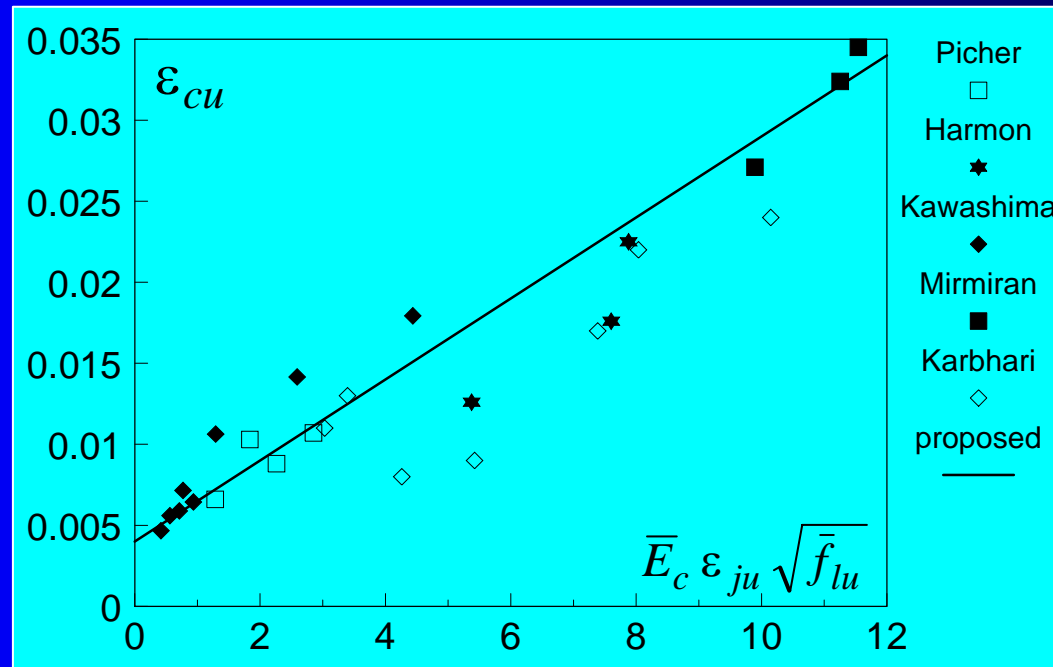


# Duttilità di elementi presso-inflessi

- E' possibile incrementarne la duttilità e, solo in misura ridotta, la resistenza
- In mancanza di determinazioni più accurate, la valutazione della curvatura ultima di una sezione presso-inflessa può essere perseguita adottando un classico legame parabola-rettangolo
  - con resistenza massima pari a  $f_{cd}$
  - e con un tratto costante che si estende fino a  $\epsilon_{ccu}$

# Equazione di progetto per la deformazione ultima

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



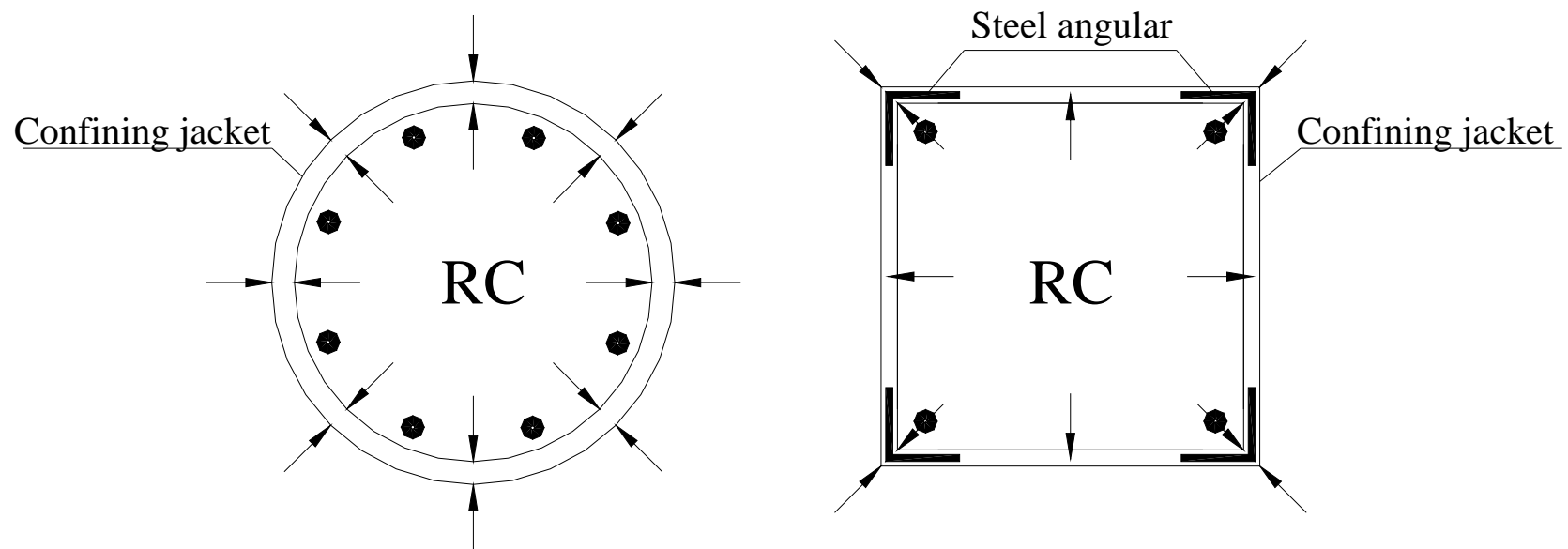
# Pressione efficace di confinamento

- La pressione efficace è calcolata utilizzando una **deformazione ridotta** di calcolo dell'FRP:

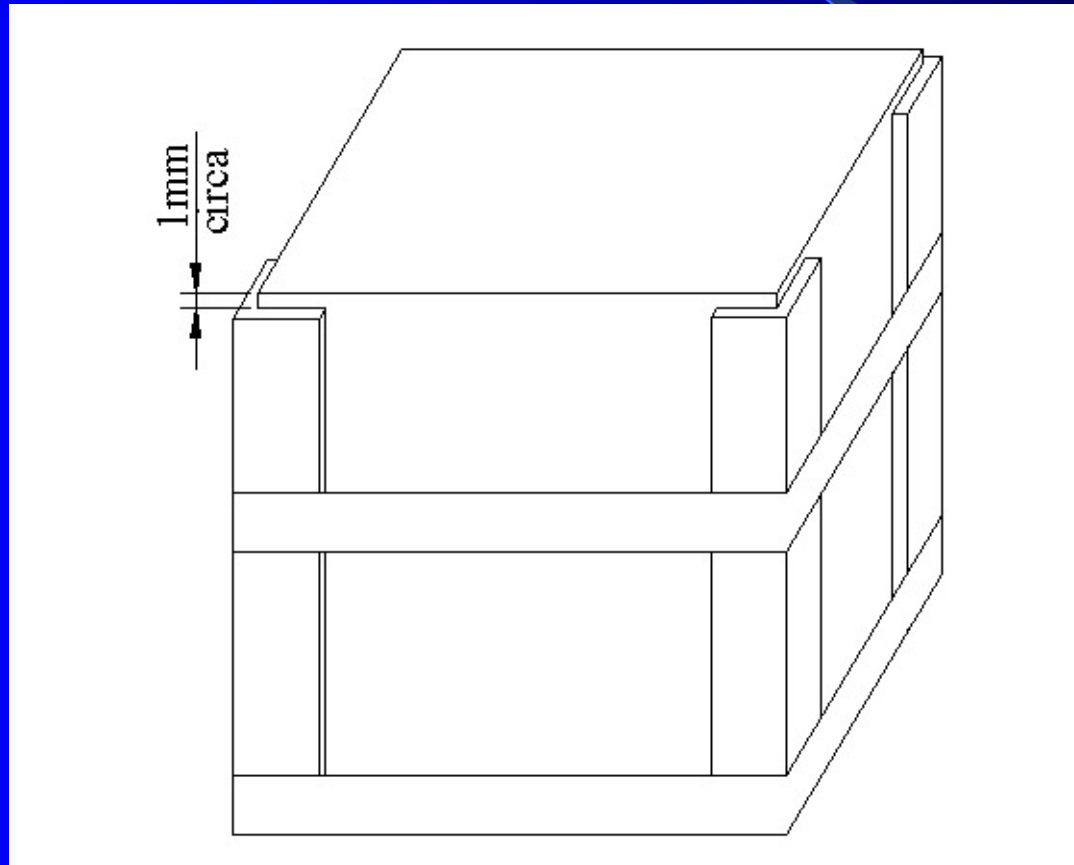
$$\varepsilon_{fd,rid} = \eta_a \cdot \varepsilon_{fu} / \gamma_f$$

- Il collasso dell'elemento confinato è assunto in corrispondenza alla deformazione ultima delle fibre.

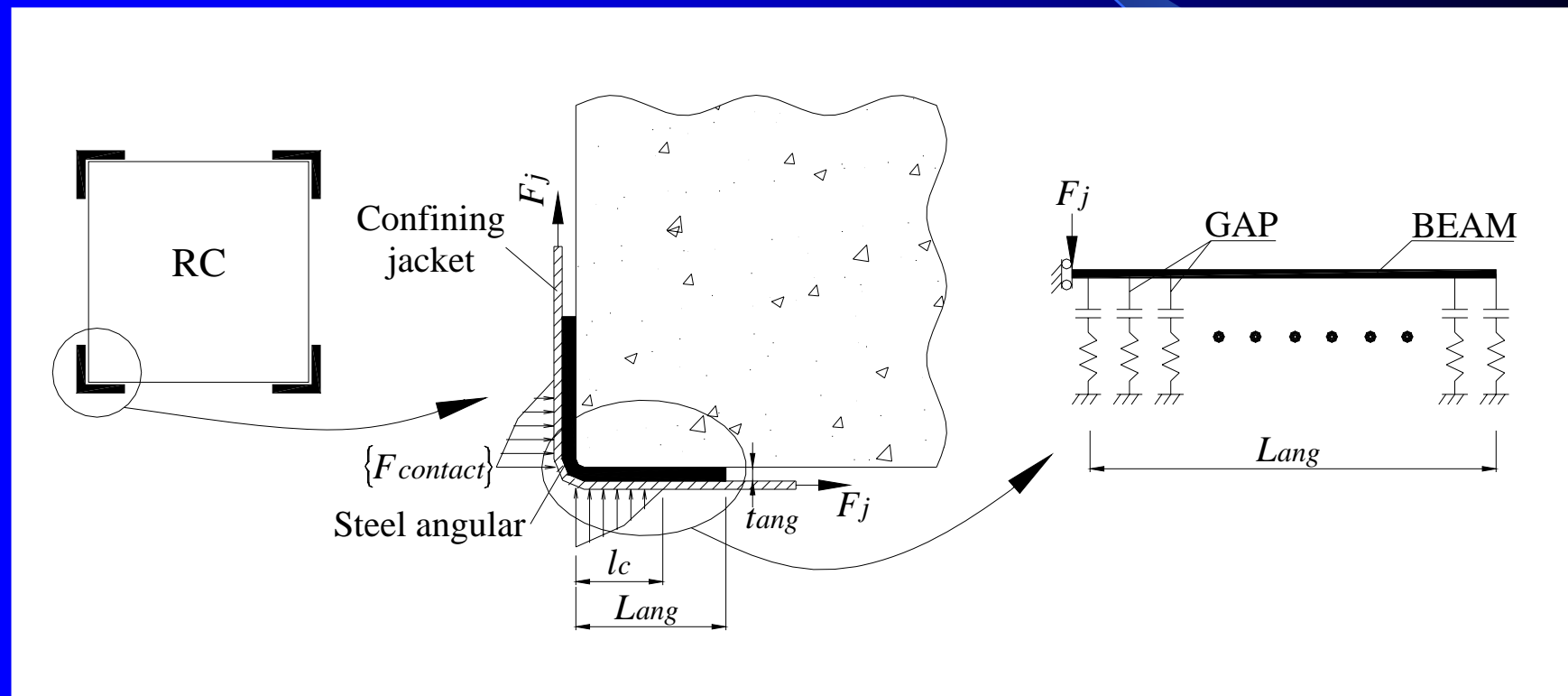
# Alcune osservazioni sul comportamento delle sezioni rettangolari



# Sezioni rettangolari

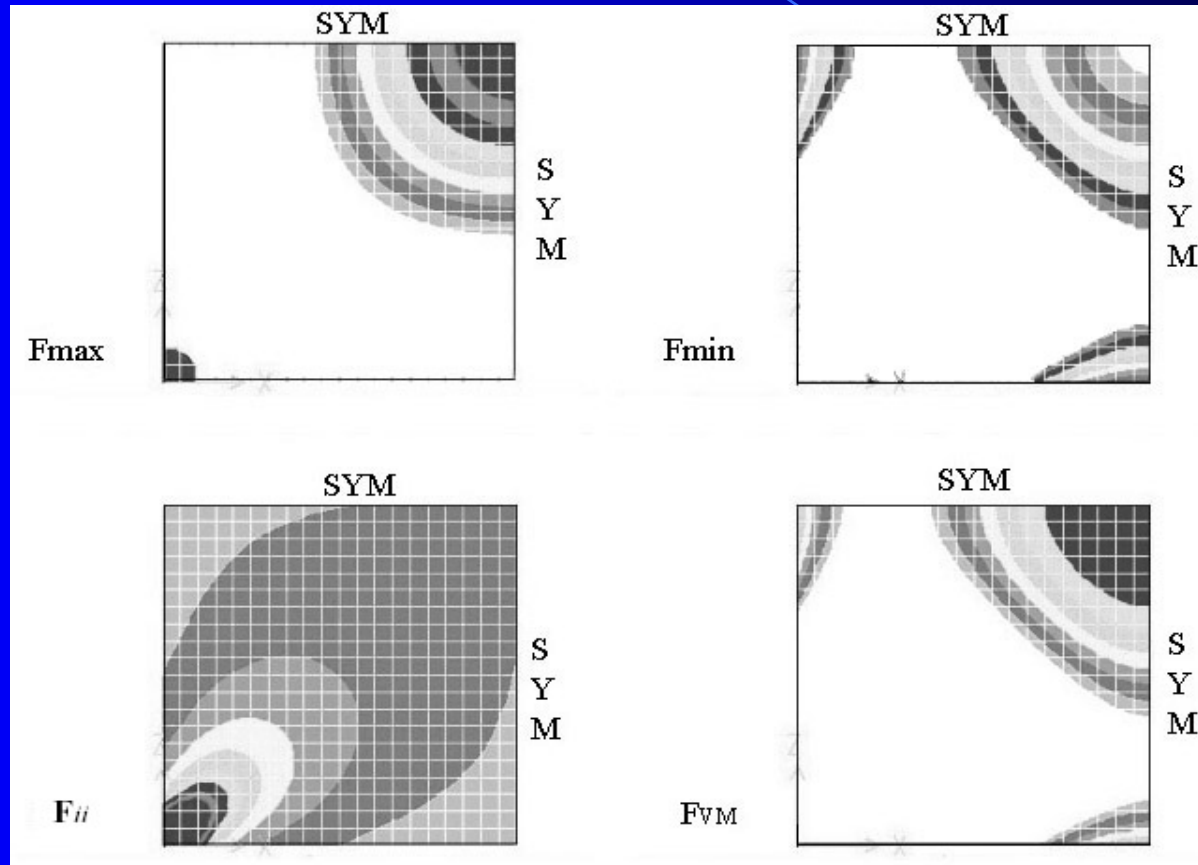


# Ruolo degli eventuali angolari



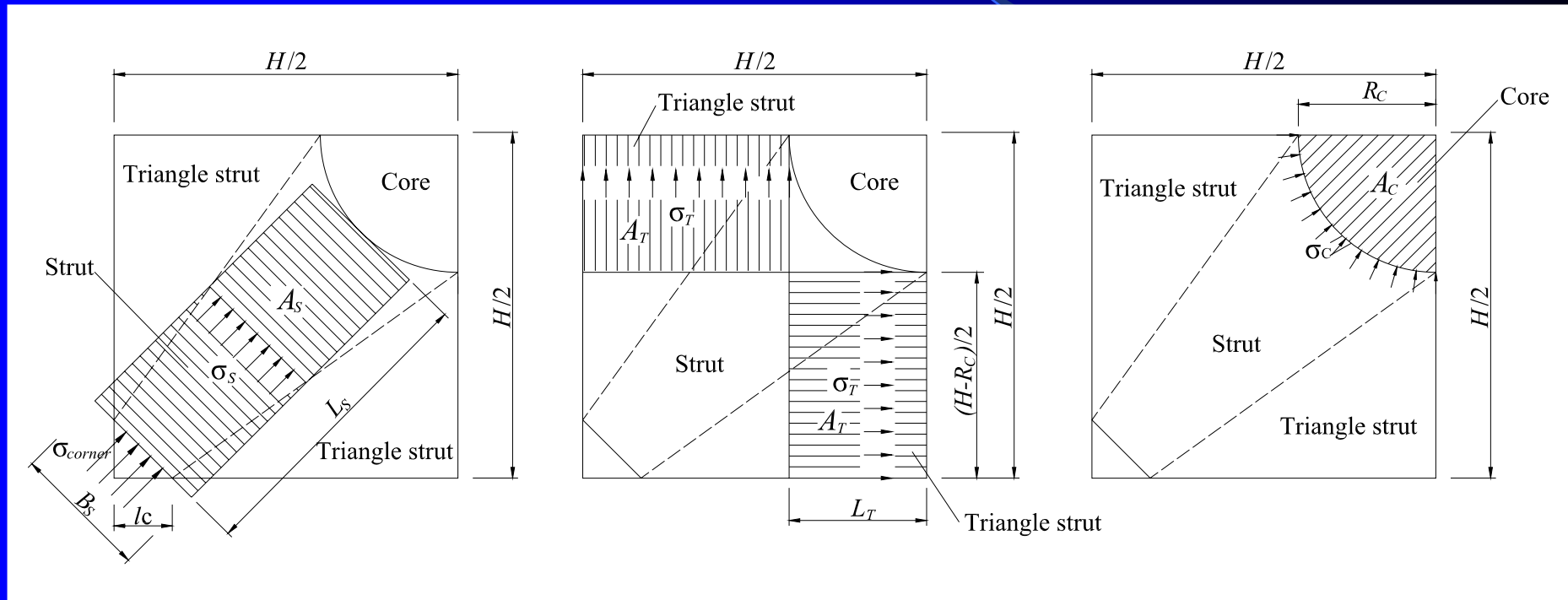


# Campi di tensione



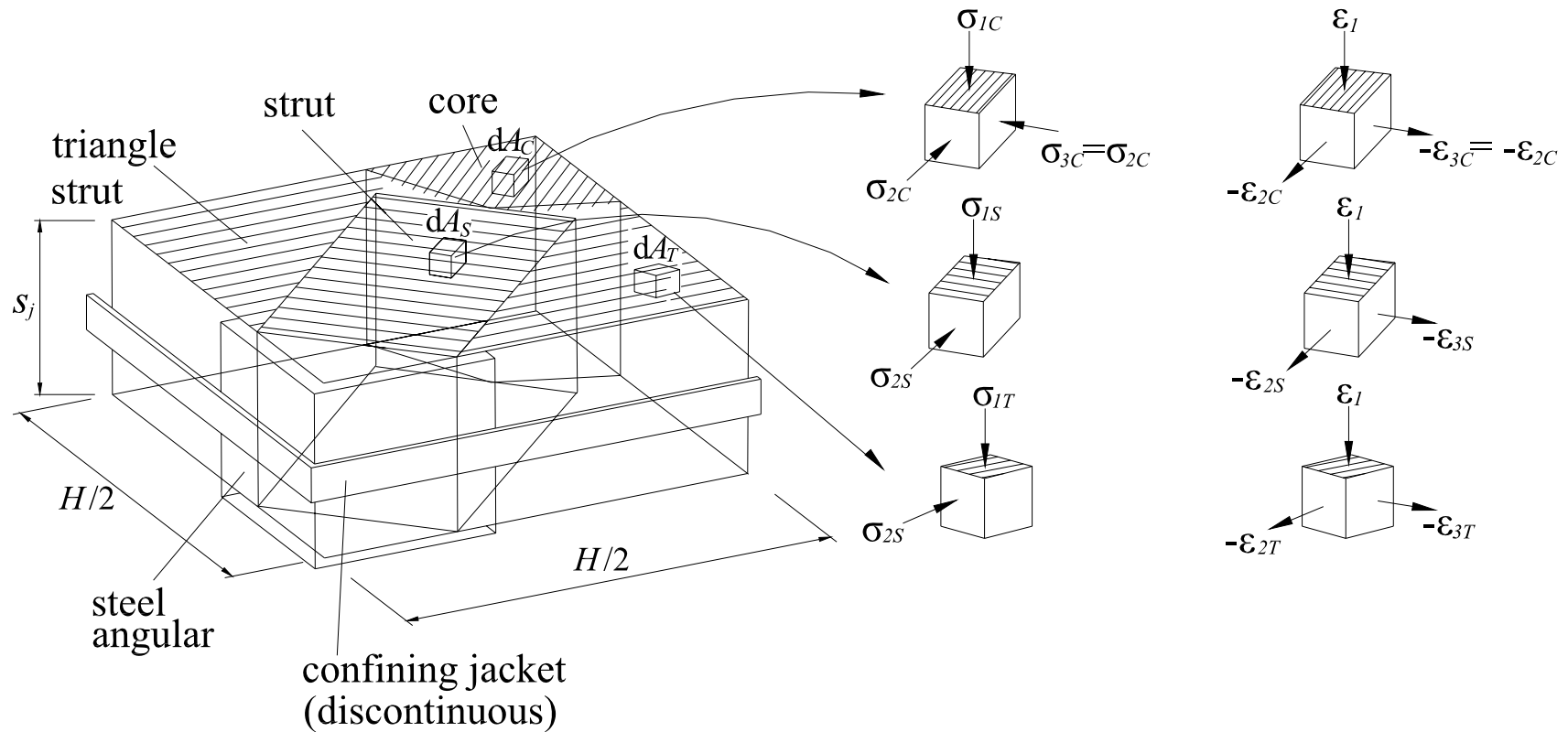
Campi di tensione in  $\frac{1}{4}$  di una sezione quadrata

# Meccanismi resistenti



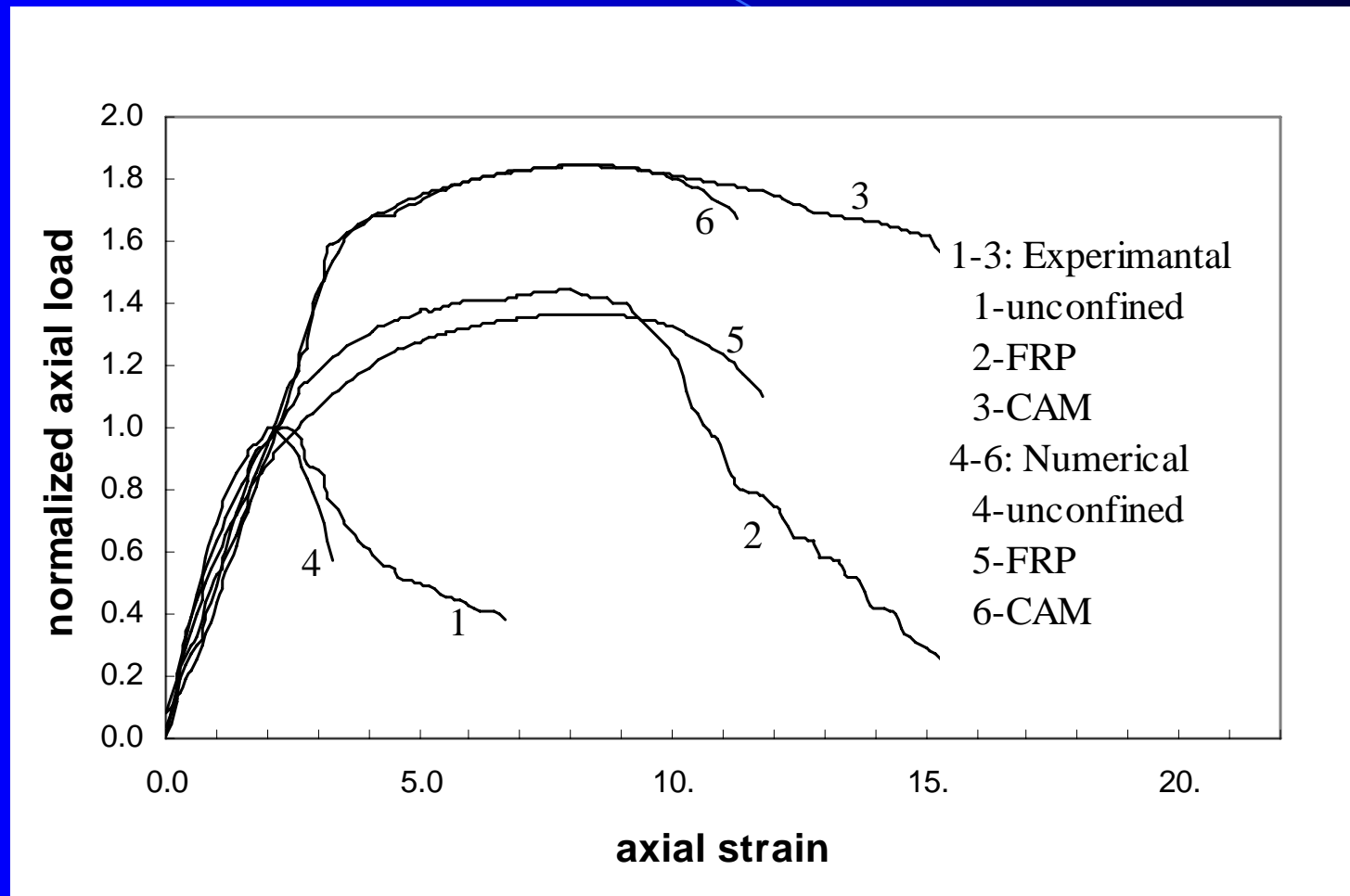
## Meccanismi a biella e del nucleo

# Tensioni nelle bielle e nel nucleo



Situazioni di confinamento differenti

# Sezioni rettangolari



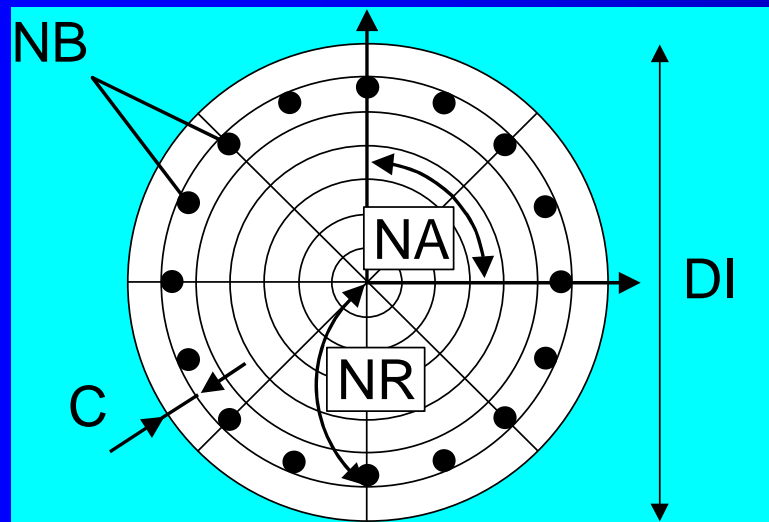
Confronto con prove sperimentali

# Rinforzo di elementi strutturali

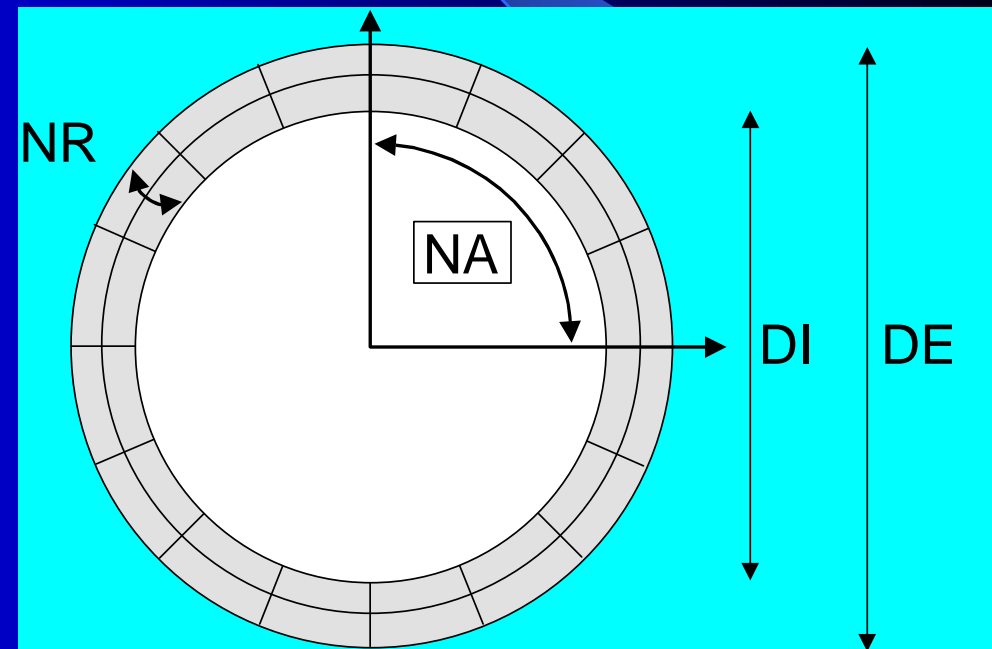
- Equazioni di progetto per l'adeguamento di sezioni in c.a. sottodimensionate
  - Seible et al. (1995)
  - Mutsuyoshi et al. (1999)
  - Monti et al. (2001)

# Rinforzo di elementi strutturali

- Discretizzazione a fibre

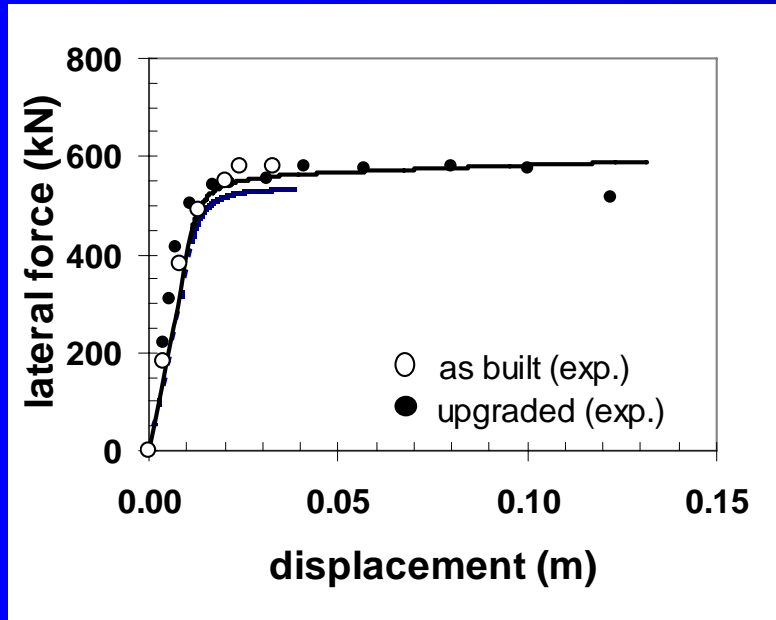


Sezione

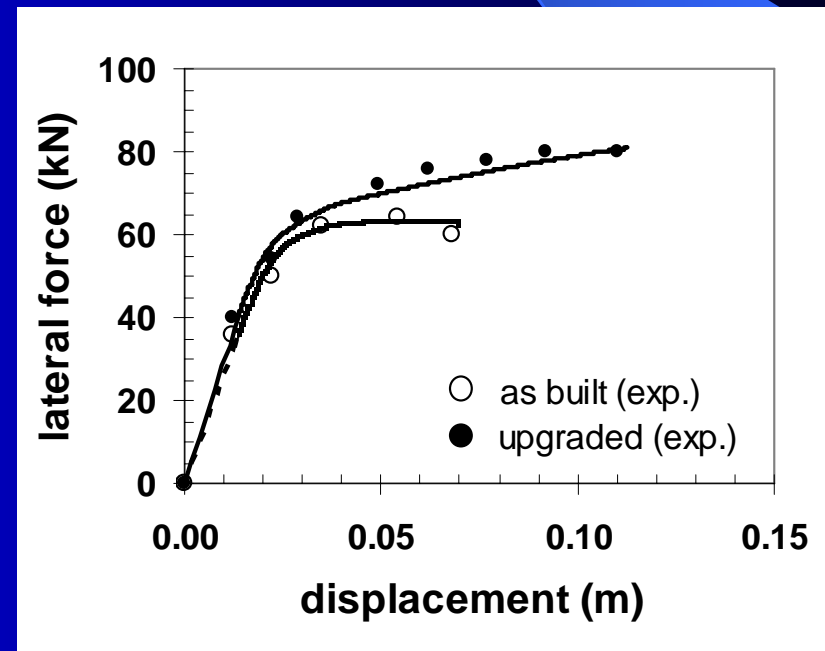


FRP jacket

# Validazione del modello



- Test di Seible et al. (1995)



- Test di Saadatmanesh et al. (1997)

# Progetto del rinforzo in FRP: Indice di adeguamento

- Rapporto tra :
  - (*obiettivo*) momento ultimo e duttilità in curvatura della sezione *rinforzata*
  - (*esistente*) momento ultimo e duttilità in curvatura della sezione *esistente*

$$I_{\text{sec}} = \frac{M^{ob} \delta_{\chi}^{ob}}{M^{es} \delta_{\chi}^{es}}$$

Dal progetto

Dall'assessment



# Espressione dell'indice

- L'indice è espresso in termini di quantità base: **deformazione** ultima e **tensione** ultima

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left( 2 + 1.25 \bar{E}_c \varepsilon_{ju} \sqrt{f_l} \right)$$

$$f'_{cc} = f_{co} \left( 0.2 + 3\sqrt{f_l} \right)$$

Le quantità **ob** dipendono dal rinforzo :  $f_l = \frac{1}{2} \rho_j f_{ju} = \frac{1}{2} \rho_j E_j \varepsilon_{ju}$

$$I_{sec} = \frac{\varepsilon_{cu}^{ob}}{\varepsilon_{cu}^{es}} \cdot \frac{\sqrt{f'_{cc}^{ob}}}{\sqrt{f'_{cc}^{es}}}$$

# Progetto di camicie in FRP

- Le quantità *obiettivo* (OB) sono espresse in funzione delle quantità *esistenti* (ES) ed in funzione dell'indice di adeguamento ( $I$ ):

$$\varepsilon_{cu}^{ob} \sqrt{\bar{f}_{cc}^{ob}} = I_{sec} \cdot \left( \varepsilon_{cu}^{es} \sqrt{\bar{f}_{cc}^{res}} \right) \longrightarrow OB = I_{sec} \cdot ES$$

Da cui:

$$\rho_f = 0.8 I_{sec}^2 \cdot \frac{\bar{f}_{cc}^{res}}{\bar{f}_{fu}} \cdot \frac{\varepsilon_{cu}^{es 2}}{\sqrt{\varepsilon_{fu}^3}}$$

$$\rho_f = \frac{4t_f}{d_f}$$

# Adeguamento sismico

- Dallo spettro di risposta locale  $R(T)$

$$I_{\text{pier}} = \frac{\delta_d^{ob}}{\delta_d^{es}} = \frac{m R(T) a_g}{F_y^{es} \delta_d^{es}}$$

$$\delta_\chi = 1 + \frac{\delta_d - 1}{3 \frac{l_p}{L} \left( 1 - 0.5 \frac{l_p}{L} \right)}$$

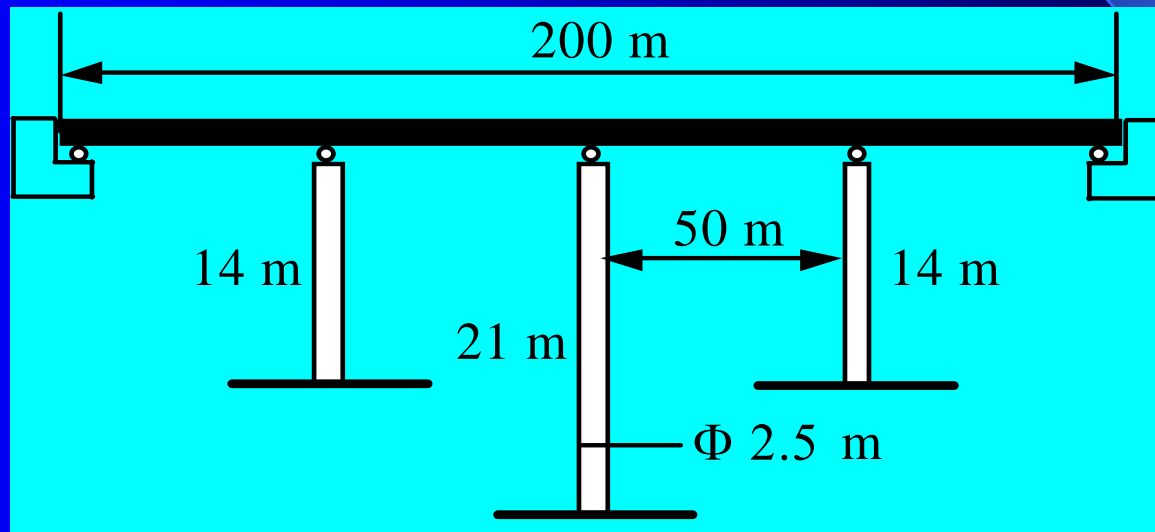
$$I_{\text{pier}} = \frac{\delta_d^{ob}}{\delta_d^{es}} \xrightarrow{\text{dall'equazione sopra}} \frac{\delta_\chi^{ob}}{\delta_\chi^{es}} = I_{\text{sec}}$$

# Adeguamento di un ponte

*DM 24.01.86*



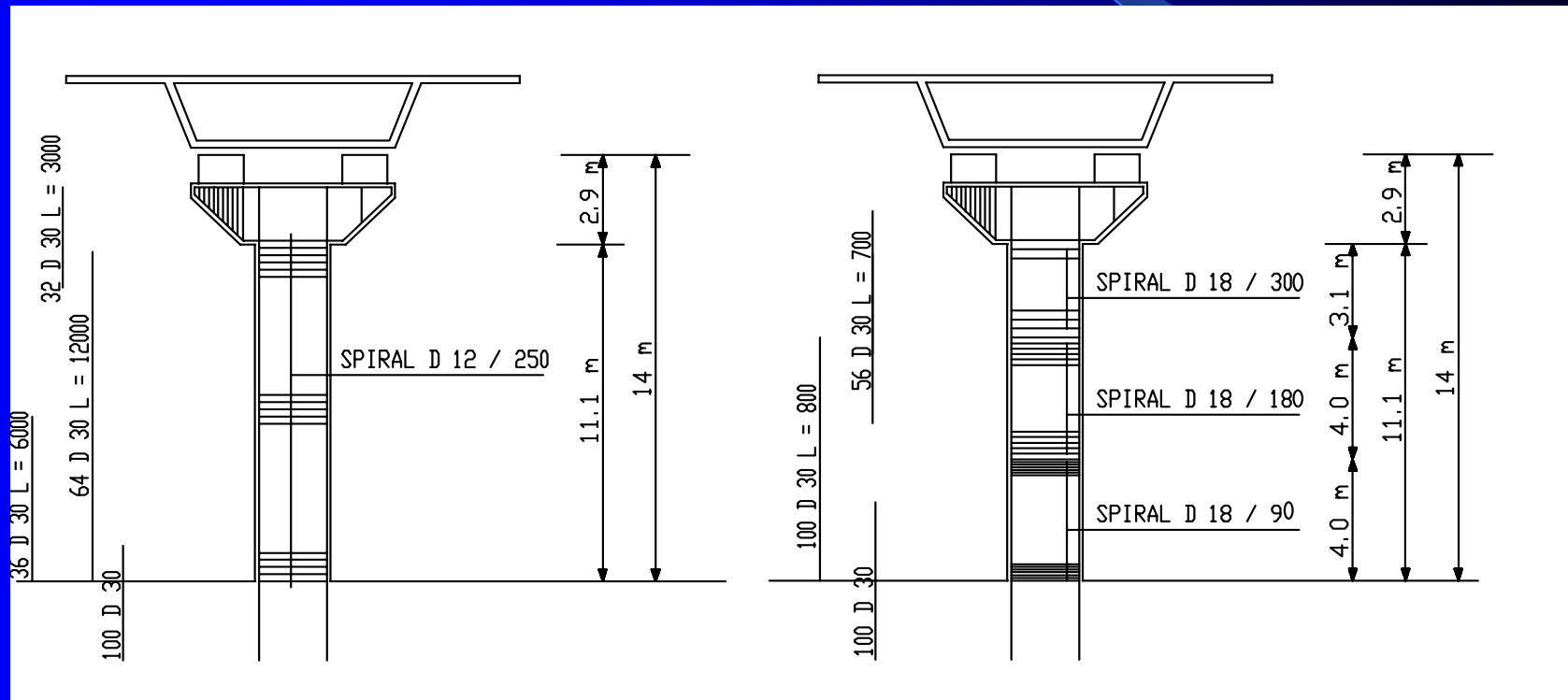
*Ordinanza 3274*



# Adeguamento di un ponte

Esistente: DM '86

Obiettivo: OPCM 3274

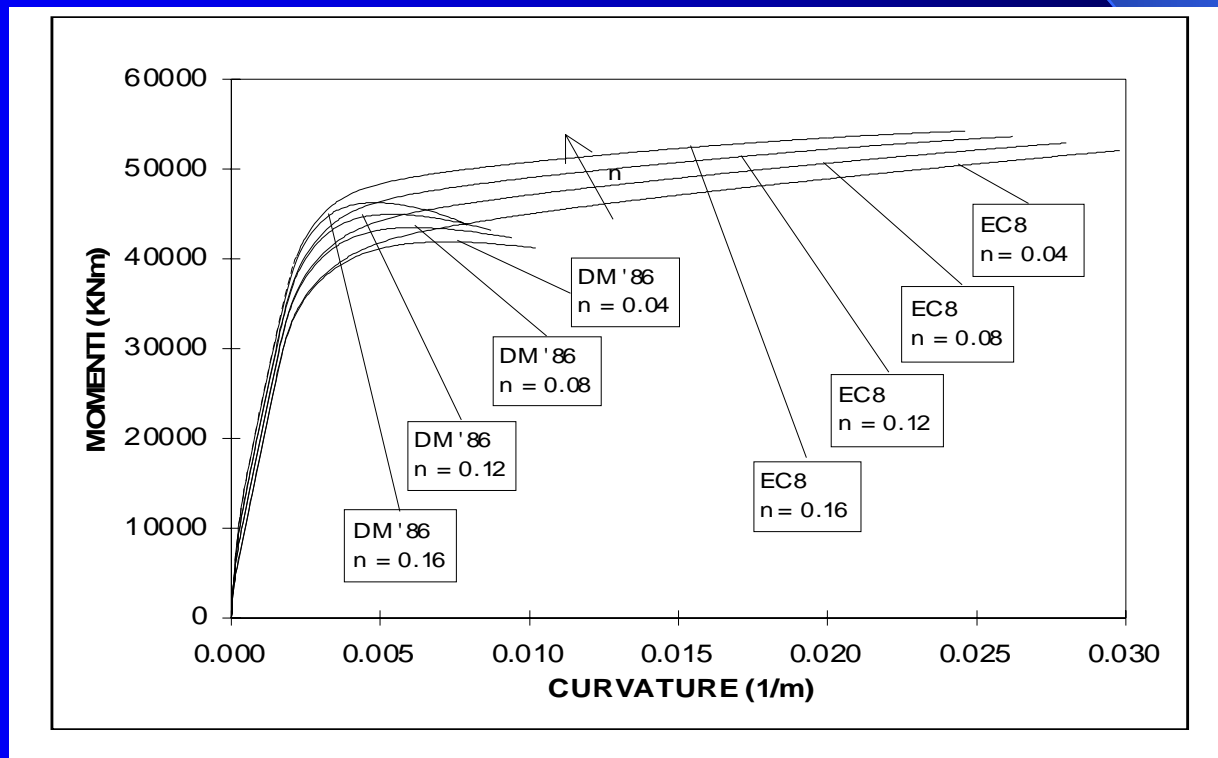


# Adeguamento di un ponte

## Confronto tra prestazioni DM '86 ed OPCM

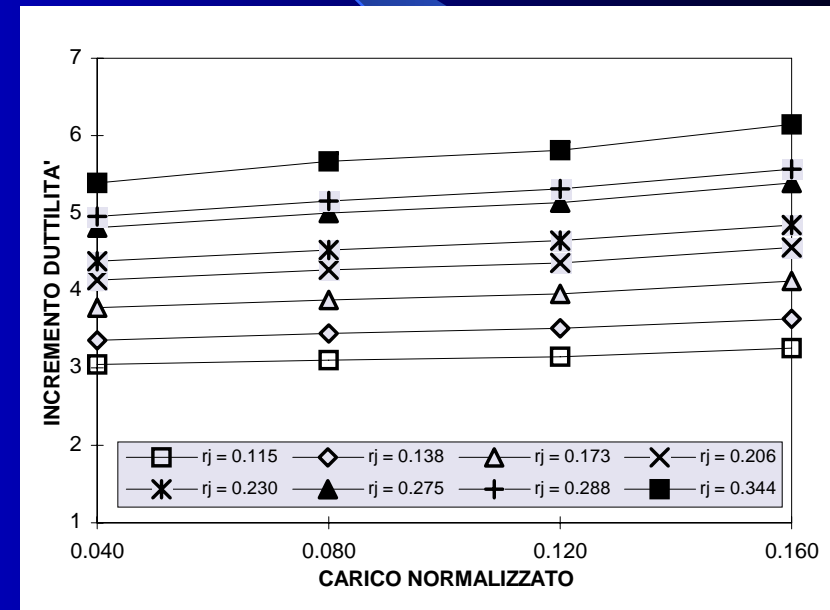
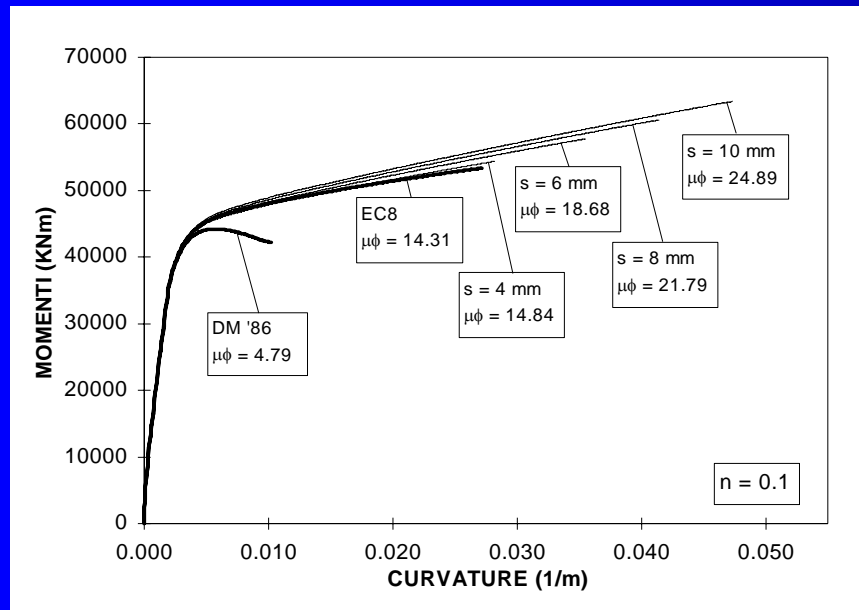
Comportamento della pila per sforzo assiale variabile:

Curve DM'86: Esistente      Curve OPCM: Obiettivo



# Adeguamento sismico di un ponte: camicie in acciaio

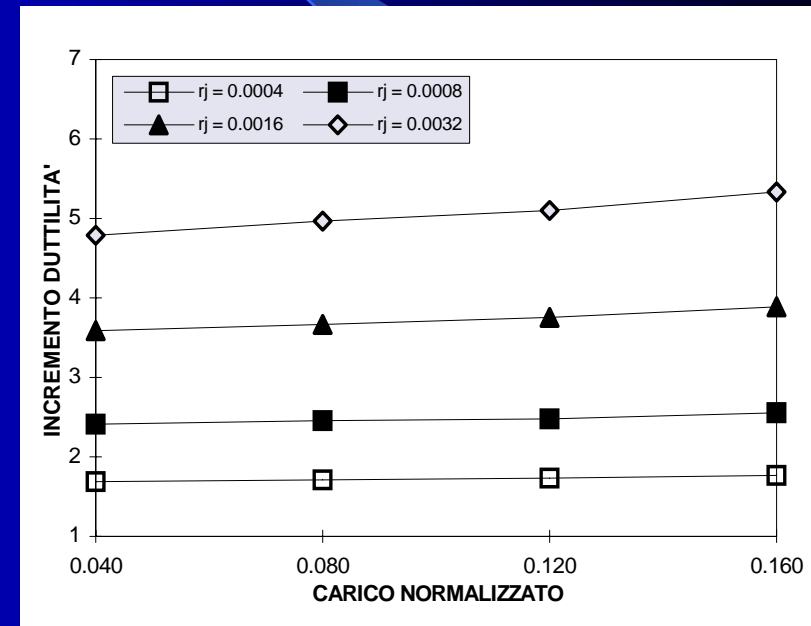
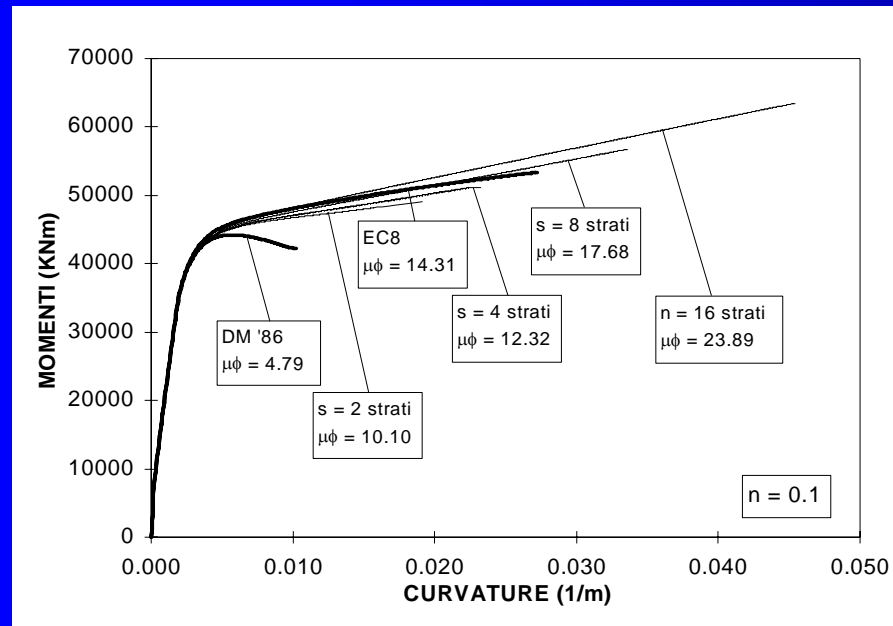
4 spessori: 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm



- L'incremento di duttilità è indipendente dal carico normalizzato
- La scelta dello spessore è dettata da considerazioni pratiche (svergolamento della camicia nella posa in opera)

# Adeguamento sismico di un ponte: fasciature in GFRP

N. strati da 0.125 mm: 2, 4, 8, 16

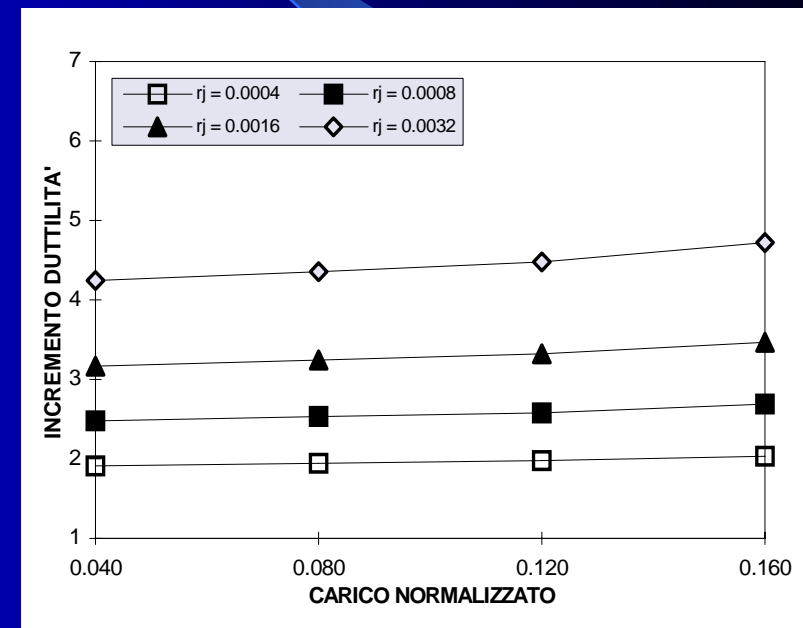
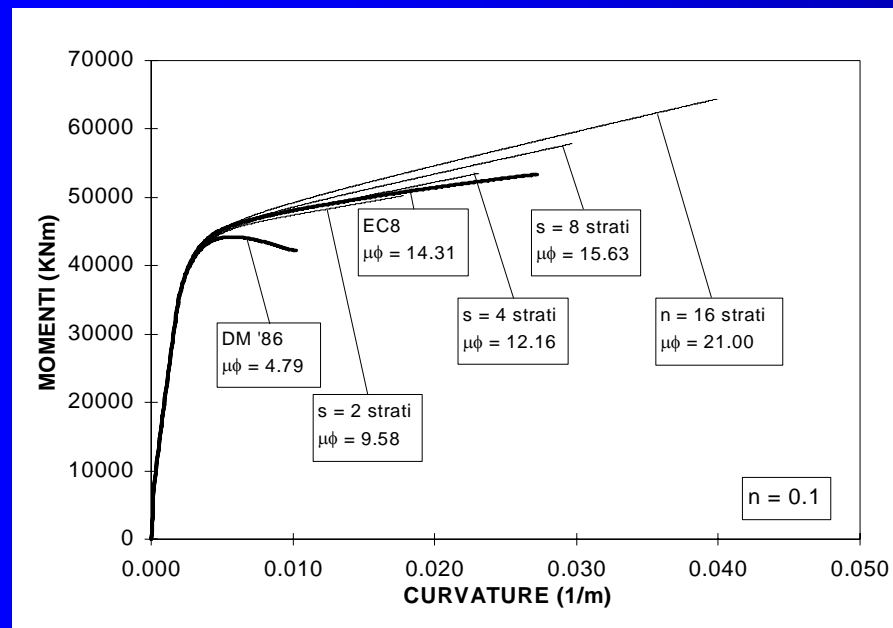


- L'incremento di duttilità è indipendente dal carico normalizzato
- La scelta dello spessore è dettata da considerazioni meccaniche e di rapidità di posa in opera



# Adeguamento sismico di un ponte: fasciature in CFRP

N. strati da 0.125 mm: 2, 4, 8, 16



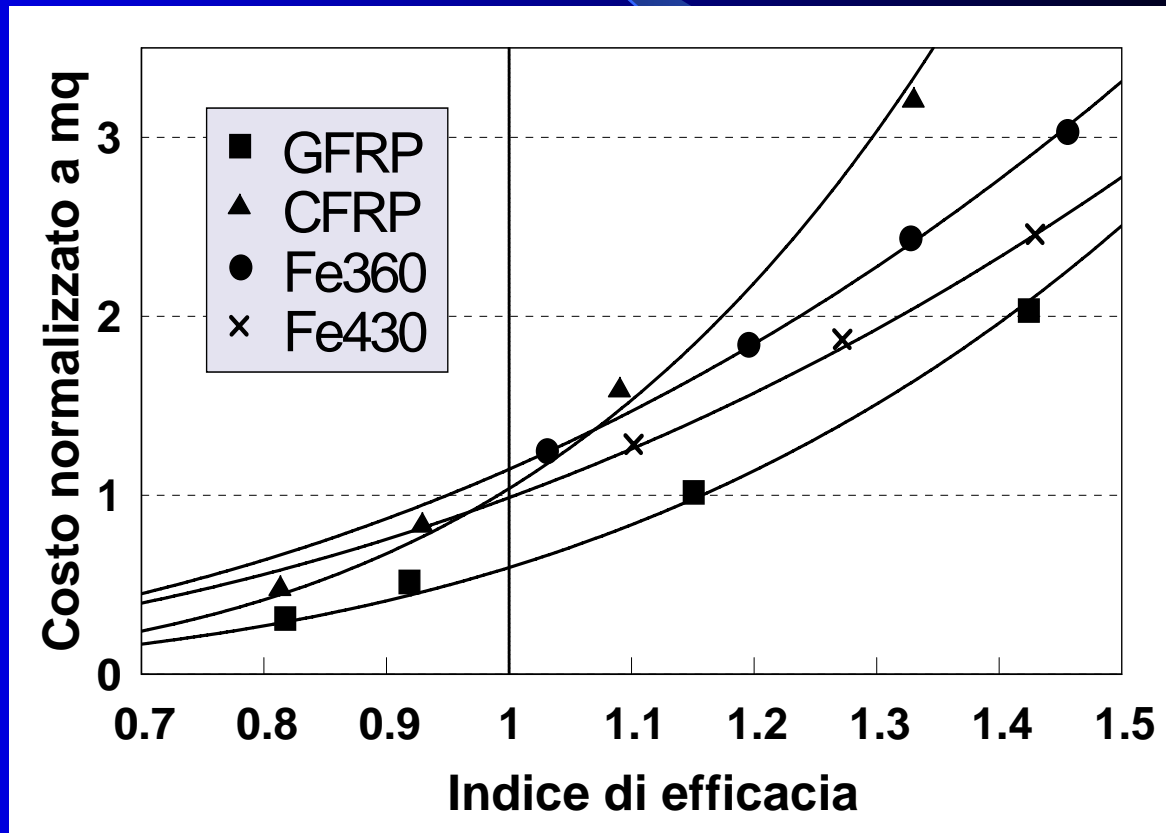
- L'incremento di duttilità è indipendente dal carico normalizzato
- La scelta dello spessore è dettata da considerazioni meccaniche e di rapidità di posa in opera

# Adeguamento sismico di un ponte

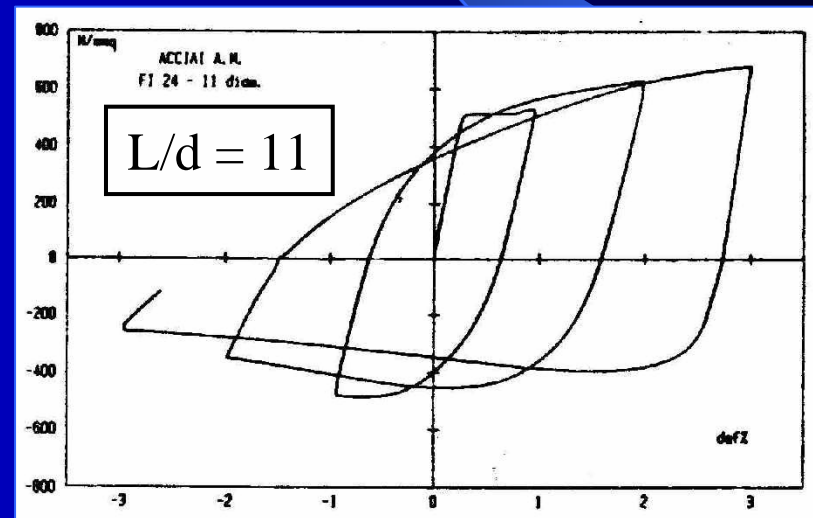
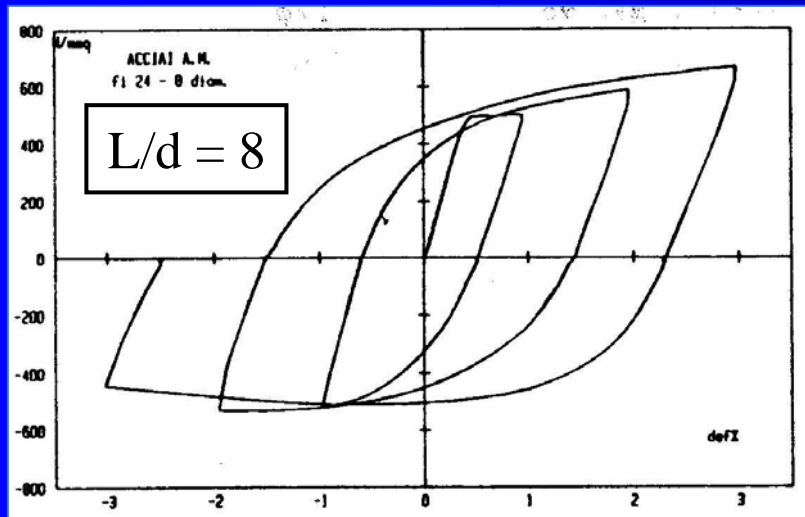
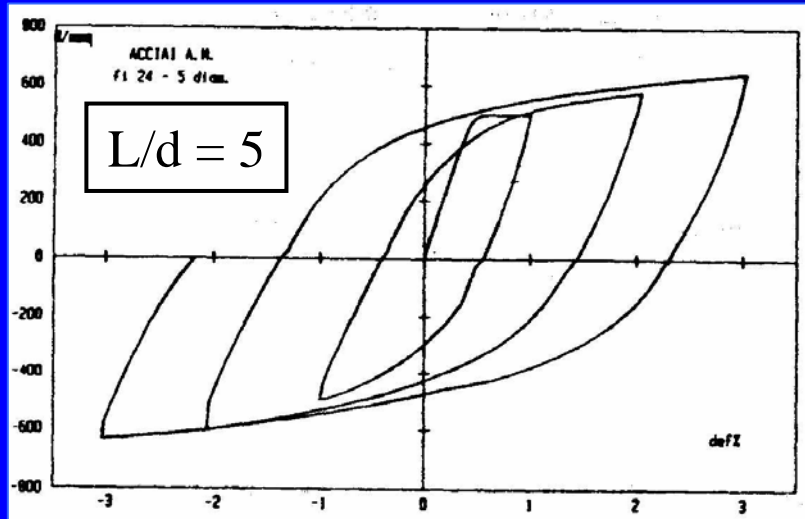
## Valutazione costi-benefici

*Indice di efficacia  
dell'intervento*

$$I_{EFF} = \frac{\Delta\delta_{effettivo}}{\Delta\delta_{obiettivo}}$$

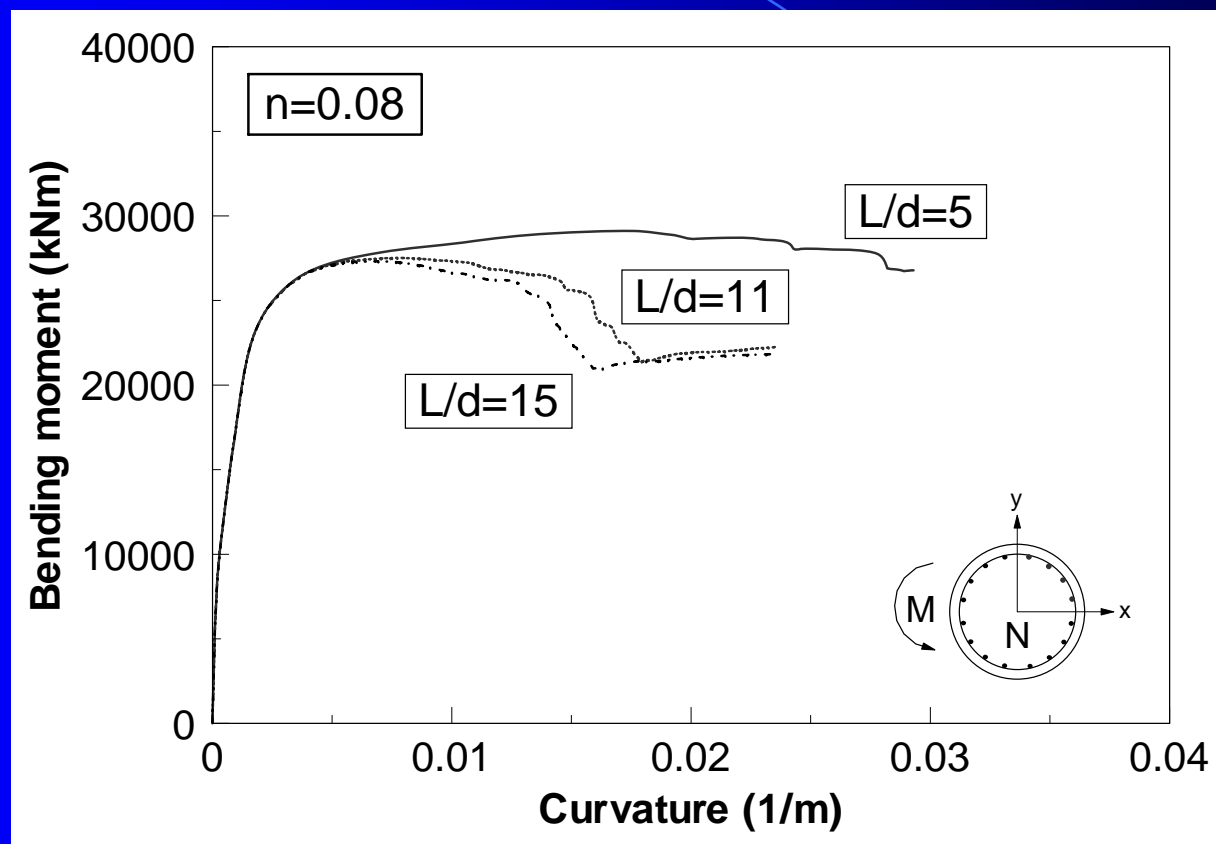


# Svergolamento delle barre



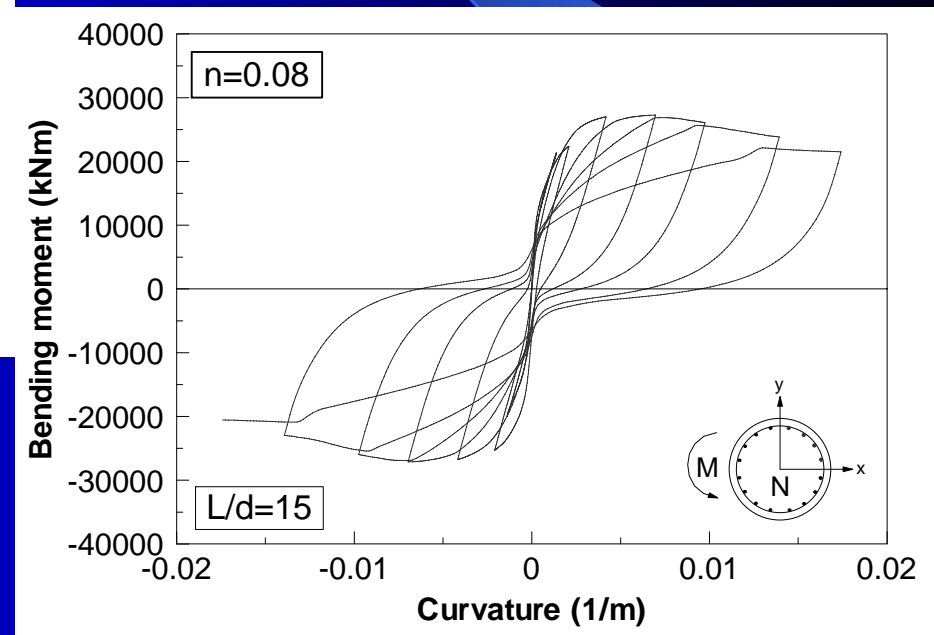
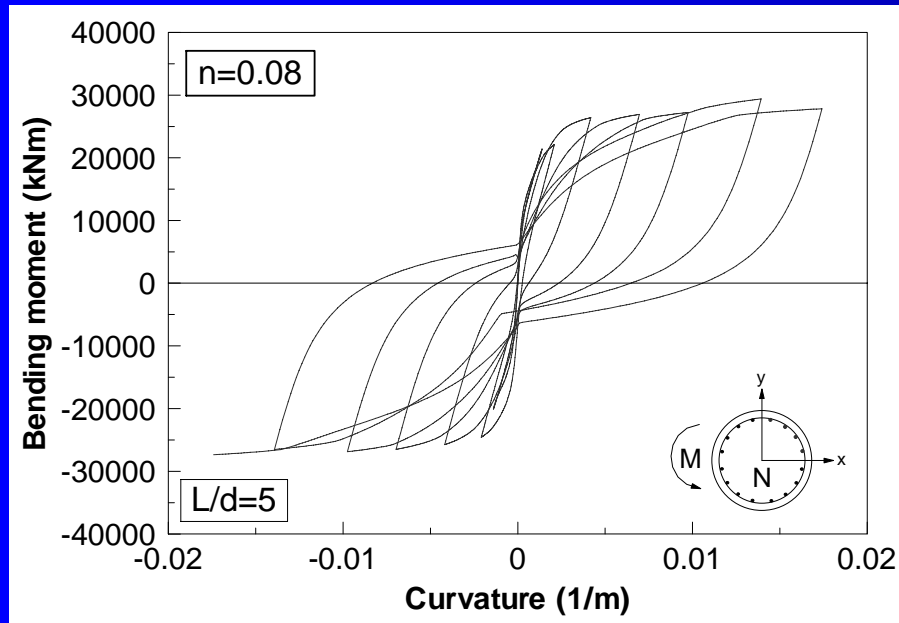
Diagrammi  
sperimentali

# Svergolamento delle barre



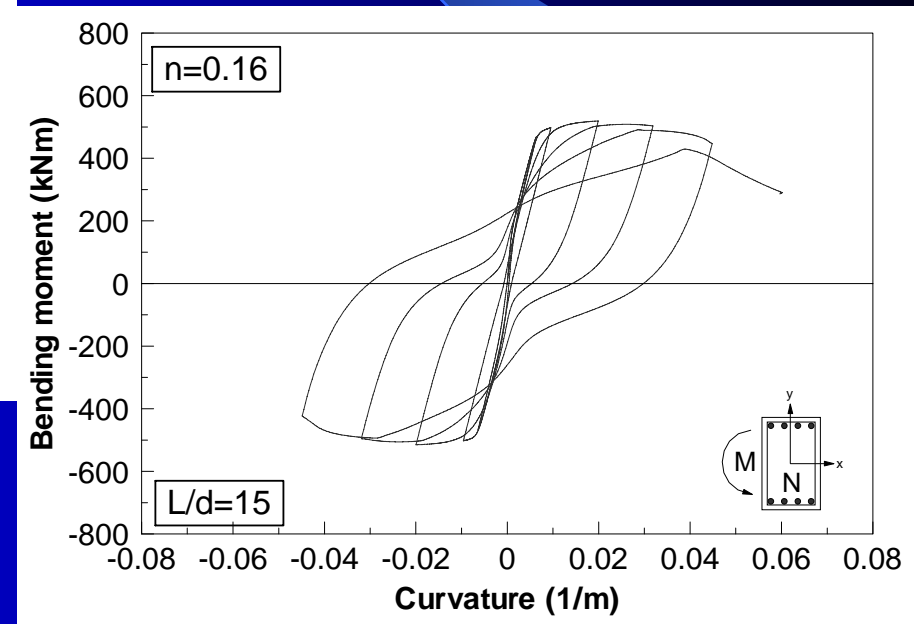
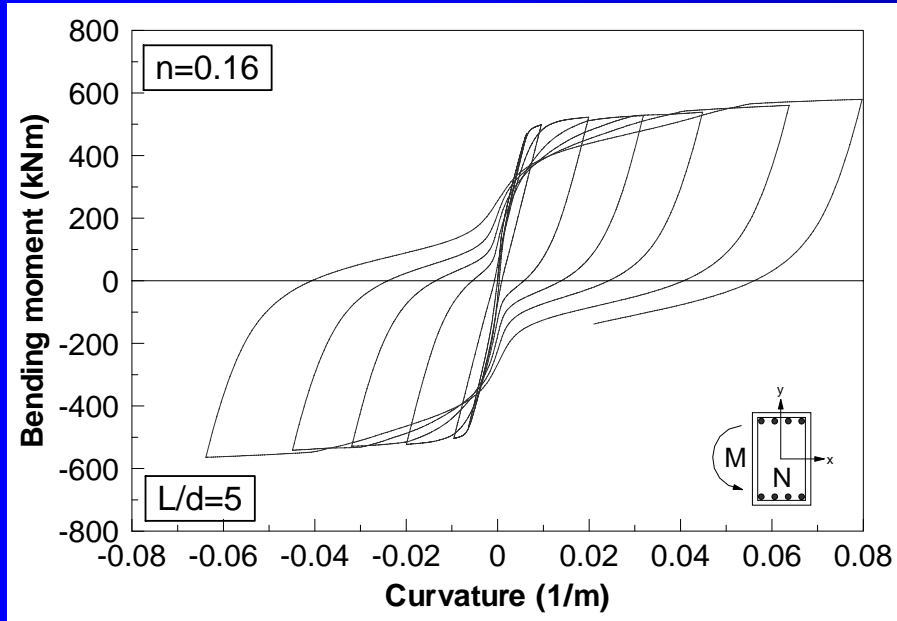
Risposta monotona di una sezione circolare con diversi valori di  $L/d$

# Svergolamento delle barre



Risposta ciclica di una sezione circolare con diversi valori di  $L/d$

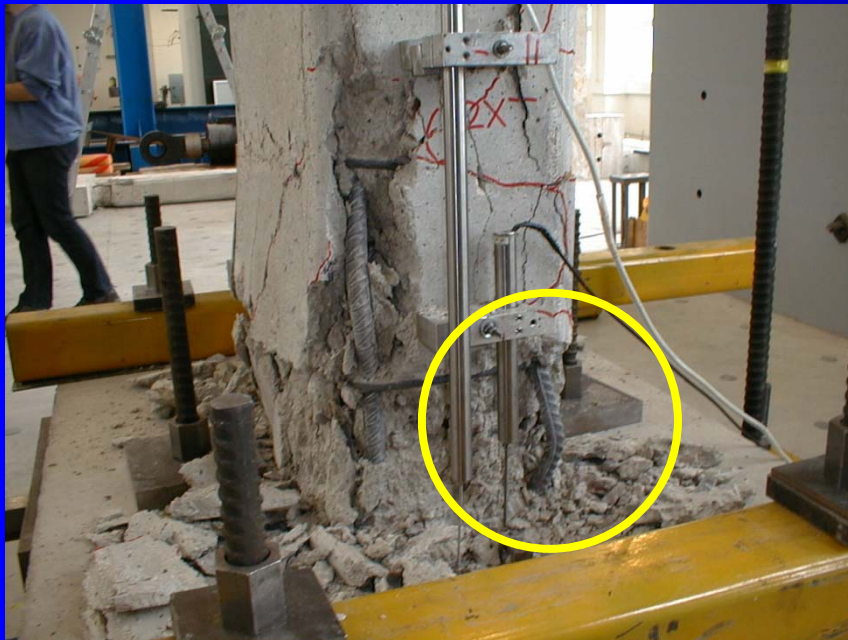
# Svergolamento delle barre



Risposta ciclica di una sezione rettangolare con diversi valori di  $L/d$

# Svergolamento delle barre

- Approccio semplificato



$$t_f = \frac{0.45nf_s^2d}{4E_{ds}E_fk_e} \approx \frac{10nd}{E_fk_e}$$

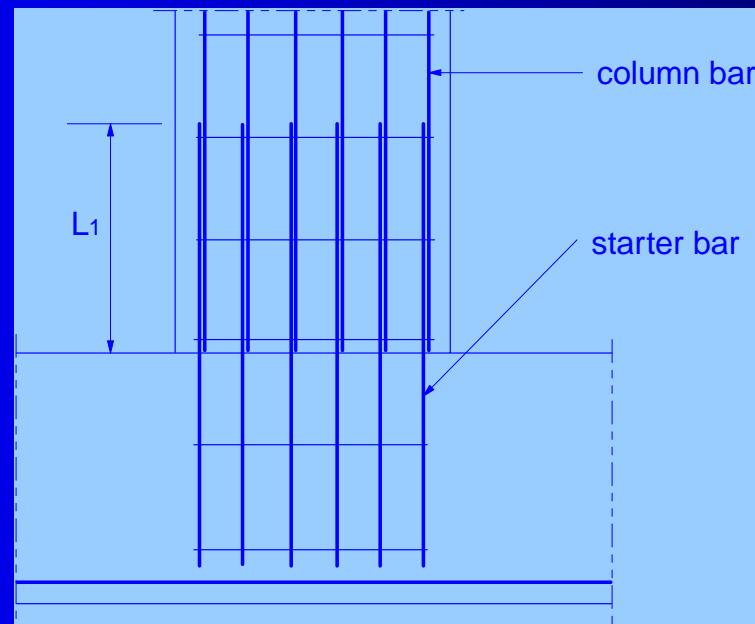
**n** = numero totale di barre

**d** = dimensione della sezione  
parallela al piano di inflessione

$$E_{ds} = \frac{4E_sE_i}{(\sqrt{E_s} + \sqrt{E_i})^2} \quad \text{“Doppio” modulo di elasticità}$$

# Zone di sovrapposizione

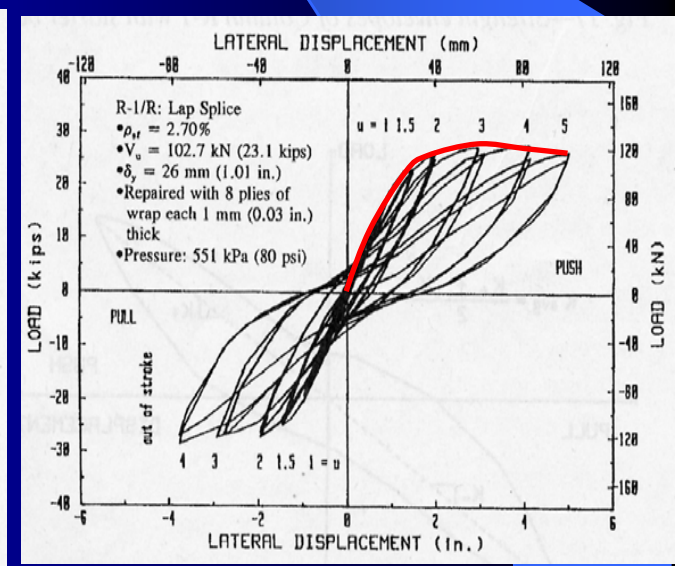
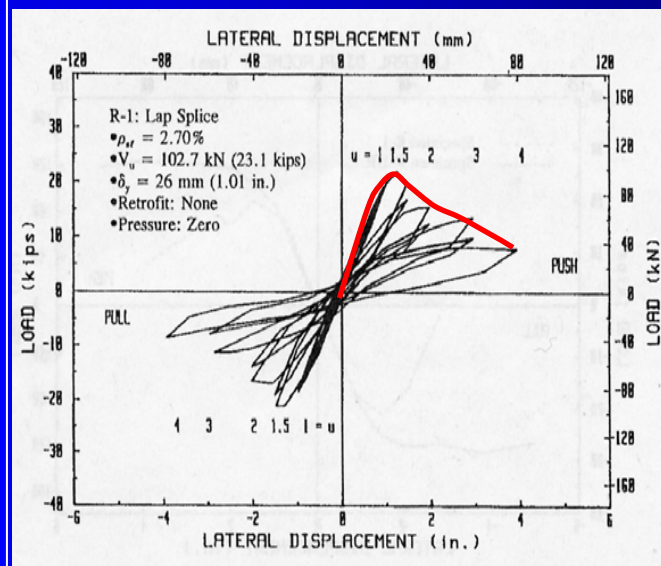
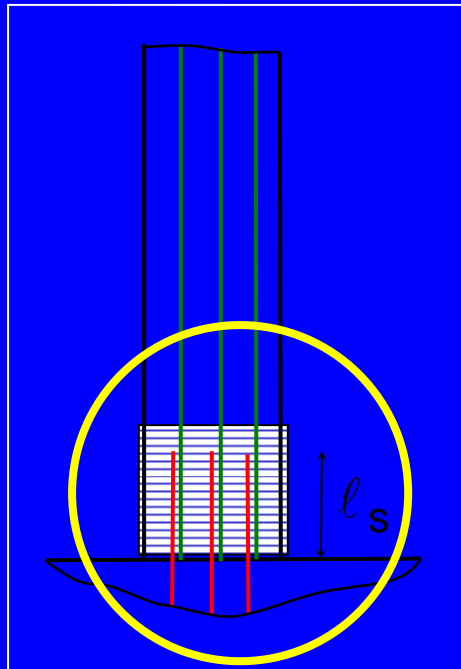
- In molti edifici esistenti le riprese dei ferri hanno lunghezza insufficiente
- Non si sviluppa tutta la resistenza delle barre e quindi tutta la resistenza teorica flessionale dei pilastri





# Zone di sovrapposizione

- Comportamento sperimentale



# Zone di sovrapposizione

- Confinamento

- Sezioni circolari

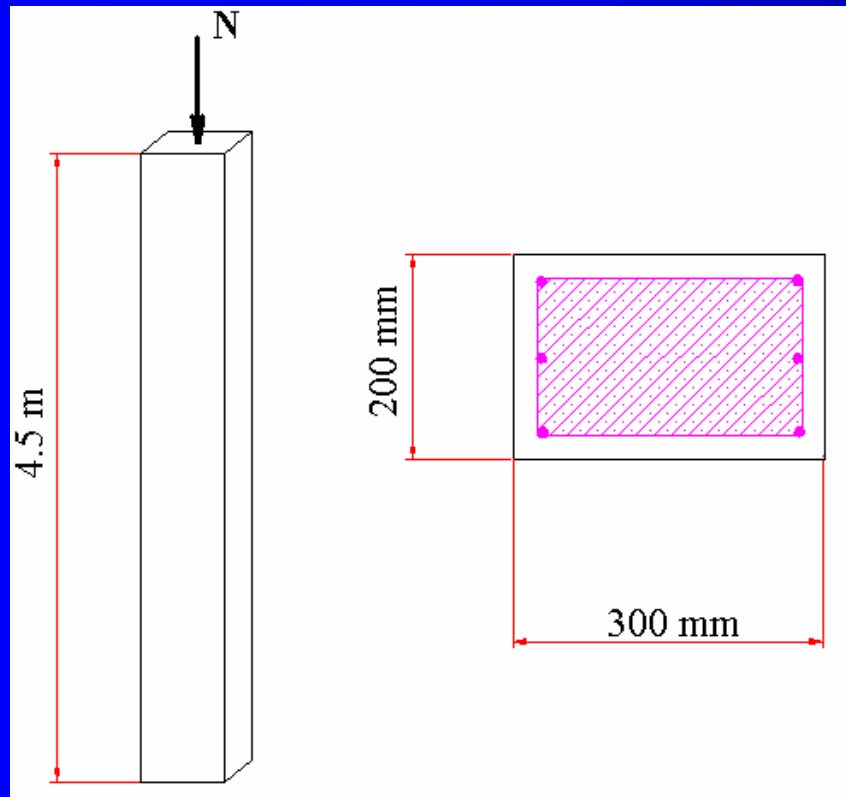
$$t_f = \frac{D(f_l - E_s \cdot 0.001)}{2E_f \cdot 0.001} \approx \frac{500 D f_l}{E_f}$$

$f_l$  = pressione di confinamento sulla lunghezza di sovrapposizione  $L_s$  (anche per svergolamento)

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

$p$  = perimetro della sezione all'interno delle barre longitudinali  
 $n$  = numero di barre sovrapposte su  $p$   
 $c$  = copriferro

# Esempio: adeguamento della resistenza a compressione di una colonna in c.a.



## Proprietà della colonna

$h$	altezza colonna	4.50 m
$b$	larghezza della sezione	0.30 m
$d$	altezza della sezione	0.20 m
$f_{cd}$	resistenza calcestruzzo non confinato	25 MPa
$f_{ccd}$	resistenza richiesta del calcestruzzo confinato con FRP (incremento del 30 %)	32 MPa
$r_c$	raggio di arrotondamento degli spigoli	30 mm

## Esempio: adeguamento della resistenza a compressione di una colonna in c.a.

Proprietà dei materiali		
$E_{fk}$	modulo di elasticità del CFRP	230000 MPa
$\epsilon_{fu}$	deformazione ultima del CFRP	1.5 %
$\gamma_f$	coefficiente parziale di sicurezza del CFRP	1.30

# Esempio: adeguamento della resistenza a compressione di una colonna in c.a.

- Pressione di confinamento necessaria ad ottenere l'incremento del 30%:

$$\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} = 1 + 2.6 \left( \frac{f_{l,eff}}{f_{cd}} \right)^{\frac{2}{3}} \rightarrow f_l = f_{cd} \frac{1}{2.6^{3/2}} \left( \frac{f_{ccd}}{f_{cd}} - 1 \right)^{\frac{3}{2}} = 25 \frac{1}{4.2} \left( \frac{32}{25} - 1 \right)^{\frac{3}{2}} = 0.90 \text{ MPa}$$

- Riduzione della pressione di confinamento (sezione rettangolare):

$$k_{eff} = k_H \cdot k_v \cdot k_\alpha = \left( 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3A_g \cdot (1 - \rho_{sg})} \right) \cdot 1 \cdot 1 = 1 - \frac{(300 - 60)^2 + (200 - 60)^2}{3 \cdot 300 \cdot 200} = 0.57$$

- Pressione di confinamento da applicare (arrotondamento degli spigoli):

$$f_l = \frac{f_{l,eff}}{k_{eff}} = \frac{0.90}{0.57} = 1.60 \text{ MPa}$$

# Esempio: adeguamento della resistenza a compressione di una colonna in c.a.

- Proprietà del CFRP prescelto

- modulo di elasticità:

$$E_j = 0.9 E_{fk} = 207000 \text{ MPa}$$

- deformazione ridotta:

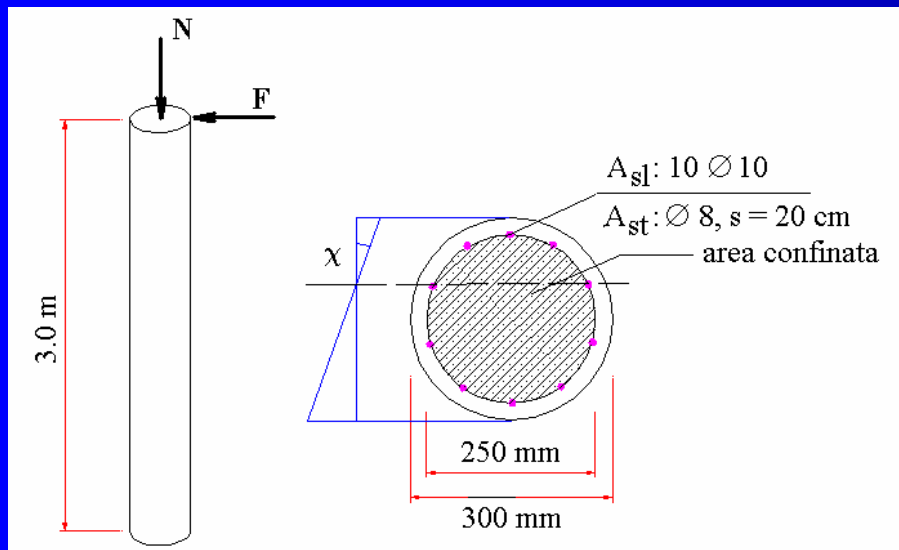
$$\varepsilon_{fd,rid} = \min\{\eta_a \varepsilon_{fu} / \gamma_f; 0.004\} = \min\{0.95 \cdot 0.015 / 1.30; 0.004\} = \min\{0.01; 0.004\} = 0.004$$

- lo spessore necessario è:

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_f E_f \varepsilon_{fd,rid} = \frac{1}{2} \frac{2(b+d)t_f}{b \cdot d} E_f \varepsilon_{fd,rid}$$
$$\rightarrow t_f = f_l \frac{b \cdot d}{(b+d) E_f \varepsilon_{fd,rid}} =$$
$$= 1.60 \frac{300 \cdot 200}{300 + 200} \frac{1}{207000 \cdot 0.004} = 0.23 \text{ mm}$$

Con fogli di spessore di 0.167 mm, si disporranno **2 strati di CFRP** per ottenere un incremento del **30% nel carico verticale**

# Esempio: adeguamento della duttilità di una colonna circolare in c.a.



Si richiede di aumentare la duttilità di 4 volte

## Proprietà della colonna

$h$	Altezza	3.0 m
$D = d_j$	Diametro esterno	0.300 m
$d_s$	Diametro interno	0.250 m
$f_c$	Resistenza del cls	25 MPa
$f_y$	Resistenza dell'acciaio	430 MPa
$N$	Carico assiale	100 kN

## Esempio: adeguamento della duttilità di una colonna circolare in c.a.

Proprietà del GFRP		
$E_{fk}$	Modulo elastico	65000 MPa
$\epsilon_{fu}$	Deformazione ultima	2.8 %
$\gamma_f$	Coefficiente di sicurezza	1.30



# Esempio: adeguamento della duttilità di una colonna circolare in c.a.

- Staffe esistenti:

$$\rho_{st} = \frac{4A_{st}}{s d_s} = \frac{4 \cdot 0.5}{20 \cdot 25} = 0.004$$

- Duttilità disponibile:

$$\delta_{\chi}^{iniz} = 6.90$$

- Indice di adeguamento:

$$I_{sez} = \frac{\delta_{\chi}^{tar}}{\delta_{\chi}^{ava}} = 4$$

- Proprietà **di progetto** del GFRP:

- Modulo elastico:

$$E_j = 0.9 E_{fk} = 58500 \text{ MPa}$$

- Deformazione ultima:

$$\varepsilon_{fd} = \eta_a \cdot \varepsilon_{fu} / \gamma_f = 0.95 \cdot \frac{0.028}{1.30} = 0.02$$

## Esempio: adeguamento della duttilità di una colonna circolare in c.a.

- Pressione di confinamento richiesta

- 1) Proveniente dalle staffe esistenti

$$f_l = \frac{1}{2} k_e \rho_{st} f_y = \frac{1}{2} 0.8 \cdot 0.004 \cdot 430 = 0.7 \text{ MPa}$$

- 2) Conseguente resistenza del cls in opera

$$\frac{f_{cc,st}}{f_c} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f_c}} - 2 \frac{f_l}{f_c} - 1.254$$

cioè:

$$\frac{f_{cc,st}}{f_c} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{0.7}{25}} - 2 \frac{0.7}{25} - 1.254 = 1.18$$

da cui:

$$f_{cc,st} = 1.18 \cdot f_c = 1.18 \cdot 25 = 29.5 \text{ MPa}$$

# Esempio: adeguamento della duttilità di una colonna circolare in c.a.

- Pressione di confinamento richiesta

3) Deformazione ultima del cls in opera

$$\varepsilon_{cu,st} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_{st} f_y \varepsilon_{su}}{f_{cc,st}} = 0.004 + \frac{1.4 \cdot 0.004 \cdot 430 \cdot 0.02}{29.5} = 0.0056$$

4) Pressione necessaria dal GFRP

$$f_l = 0.4 I_{sez}^2 \frac{f_{cc,st} \cdot \varepsilon_{cu,st}^2}{\varepsilon_{ju}^{1.5}} = 0.4 \cdot 4^2 \frac{29.5 \cdot 0.0056^2}{0.02^{1.5}} = 2.1 \text{ MPa}$$

5) Spessore dell'avvolgimento con GFRP

$$t_j = \frac{f_l}{2 E_f \varepsilon_{fd}} = \frac{2.1}{2 \cdot 58500 \cdot 0.02} = 0.27 \text{ mm} \Rightarrow 2 \text{ strati da } 0.167 \text{ mm}$$