



# Workshop



Materiali ed Approcci Innovativi per il  
Progetto in Zona Sismica  
e la Mitigazione della Vulnerabilità delle Strutture

12-13 Febbraio 2007



## Sulla deformabilità del calcestruzzo confinato con FRP

*Ciro Faella, Roberto Realfonzo, Angela Di Nardo*

Università degli Studi di Salerno  
Dipartimento di Ingegneria Civile



# Oggetto



- ➔ Legami costitutivi del calcestruzzo confinato con FRP
- ➔ Legge deformazione laterale-deformazione assiale
- ➔ Formulazione di un'espressione per la valutazione della deformazione ultima  $\varepsilon_{CC}$



# Legami costitutivi del calcestruzzo confinato con FRP

Le curve analitiche tensione-deformazione ad oggi proposte per la modellazione del comportamento del calcestruzzo compresso confinato con FRP sono state formulate con due diverse finalità:

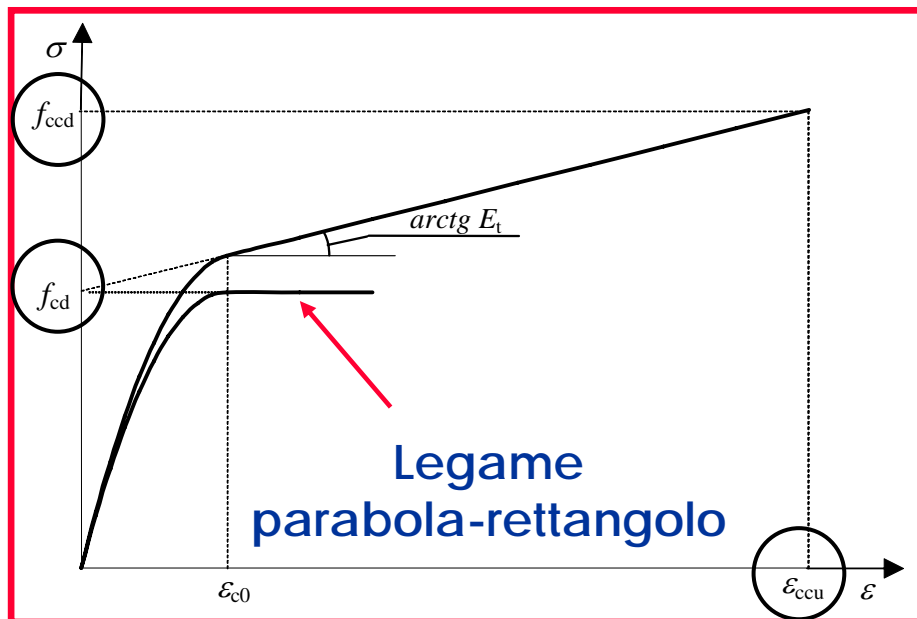
➔ **UTILIZZO IN AMBITO PROGETTUALE**

➔ **IMPIEGO IN ALGORITMI PER LA SIMULAZIONE DEL COMPORTAMENTO SPERIMENTALE**



# Il legame costitutivo adottato dal DT200/2004 del CNR

Assumendo  $\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}}$  il legame può essere espresso come segue:



**Ramo parabolico:**

$$\frac{f_c}{f_{cd}} = (1 + \gamma) \cdot \bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}^2 \quad \bar{\varepsilon} \in (0,1)$$

**Ramo lineare:**

$$\frac{f_c}{f_{cd}} = 1 + (\gamma - 1) \cdot \bar{\varepsilon} \quad \bar{\varepsilon} > 1$$

dove  $\gamma$  è dato da:

$$\gamma = \frac{f_{cd} + E_t \cdot \varepsilon_{c0}}{f_{cd}} = \frac{f_{c1}}{f_{cd}} \quad E_t = \frac{f_{ccd} - f_{cd}}{\varepsilon_{cc}}$$



# Resistenza e deformazione ultima del calcestruzzo confinato con FRP

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

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

$$f_{l,eff} = k_{eff} \cdot f_l = \frac{1}{2} \cdot k_{eff} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid}$$

$k_{eff} (\leq 1)$  = "coefficiente di efficienza";

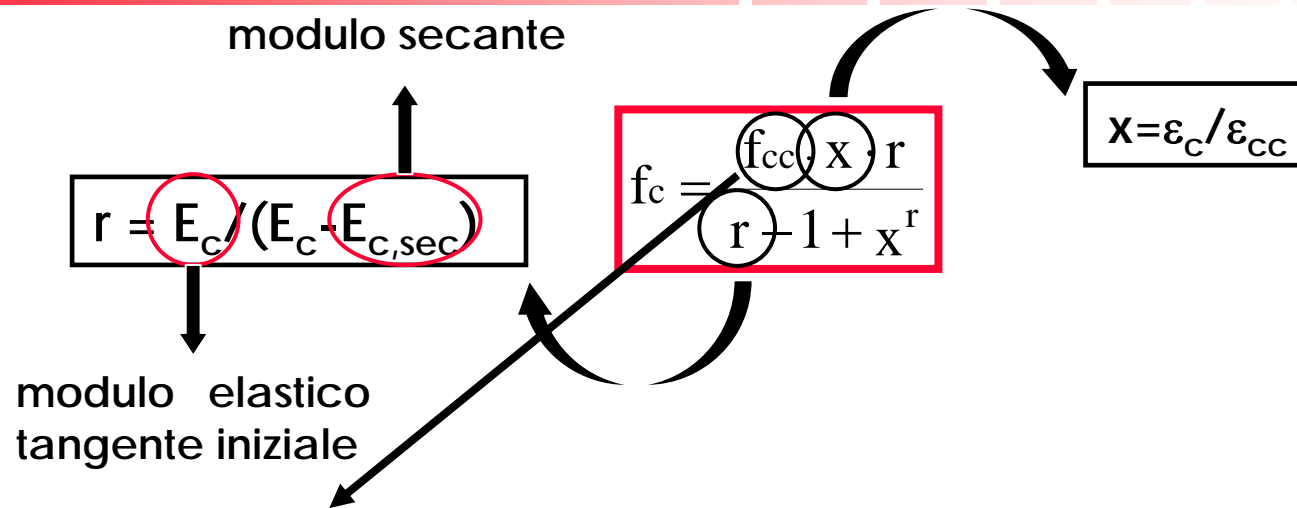
$E_f$  = modulo di Young delle fibre;

$\varepsilon_{fd,rid}$  = valore ridotto della deformazione ultima dell'FRP;

$\rho$  = percentuale geometrica del rinforzo.



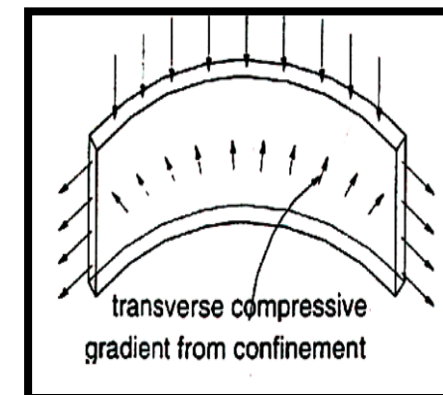
# Il legame costitutivo di Popovics



La resistenza  $f_{cc}$  del calcestruzzo confinato e la corrispondente deformazione  $\varepsilon_{cc}$  sono entrambe espresse in funzione della pressione laterale di confinamento  $f_l$

Rigidezza del sistema in FRP ( $C_j$ )

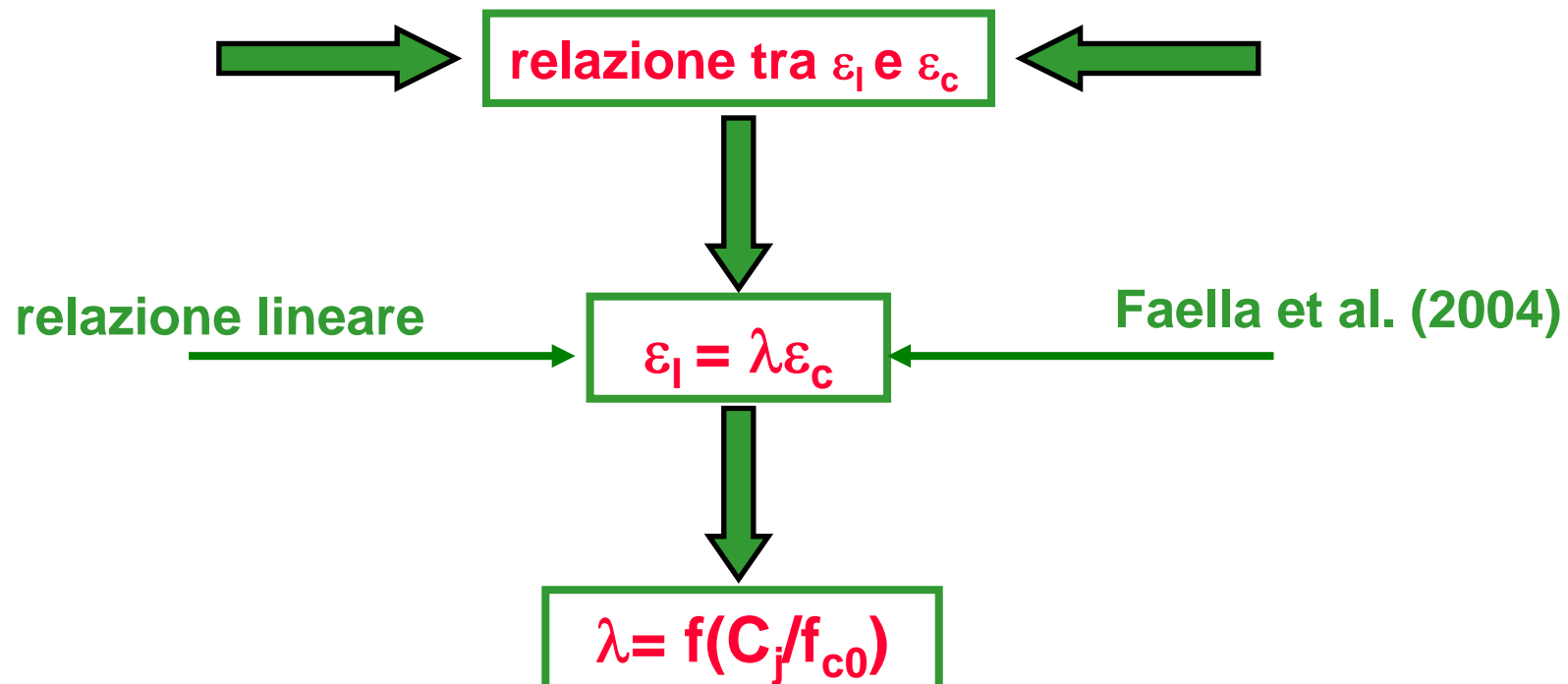
$$f_l = \frac{2 \cdot n_l \cdot t_j \cdot E_{frp} \cdot \varepsilon_l}{D}$$





# Il legame costitutivo di Popovics esteso al caso degli FRP

Com'è ben noto, non essendo  $f_l$  costante durante il processo di carico, l'estensione della legge di Popovics al caso di confinamento con sistemi in FRP richiede la definizione di una





# Stima del parametro $\lambda$

Mirmiram & Shahawy, 1997

$$\lambda_{\max} = -0.7611 \cdot \ln \frac{C_j}{f_{c0}} + 4.0167$$

$$\lambda_u = -0.1375 \cdot \ln \frac{C_j}{f_{c0}} + 0.8646$$

Xiao & Wu, 2000

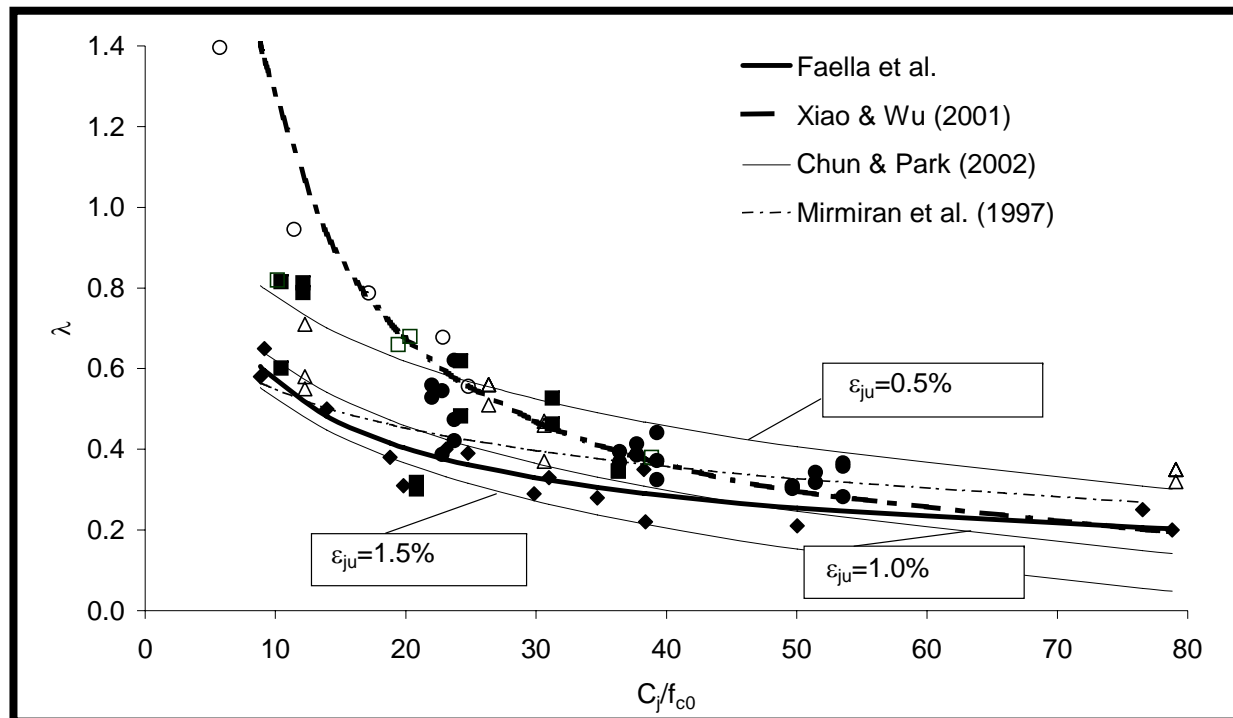
$$\lambda_u = 10 \cdot \left( \frac{C_j}{f_{c0}} \right)^{-0.9}$$

Chun & Park, 2002

$$\lambda_u = -0.2305 \cdot \ln \frac{C_j \cdot \varepsilon_{ju}}{f_{c0}} + 0.087$$

Faella et al., 2004

$$\lambda_u = 1.8 \cdot \left( \frac{C_j}{f_{c0}} \right)^{-0.5}$$





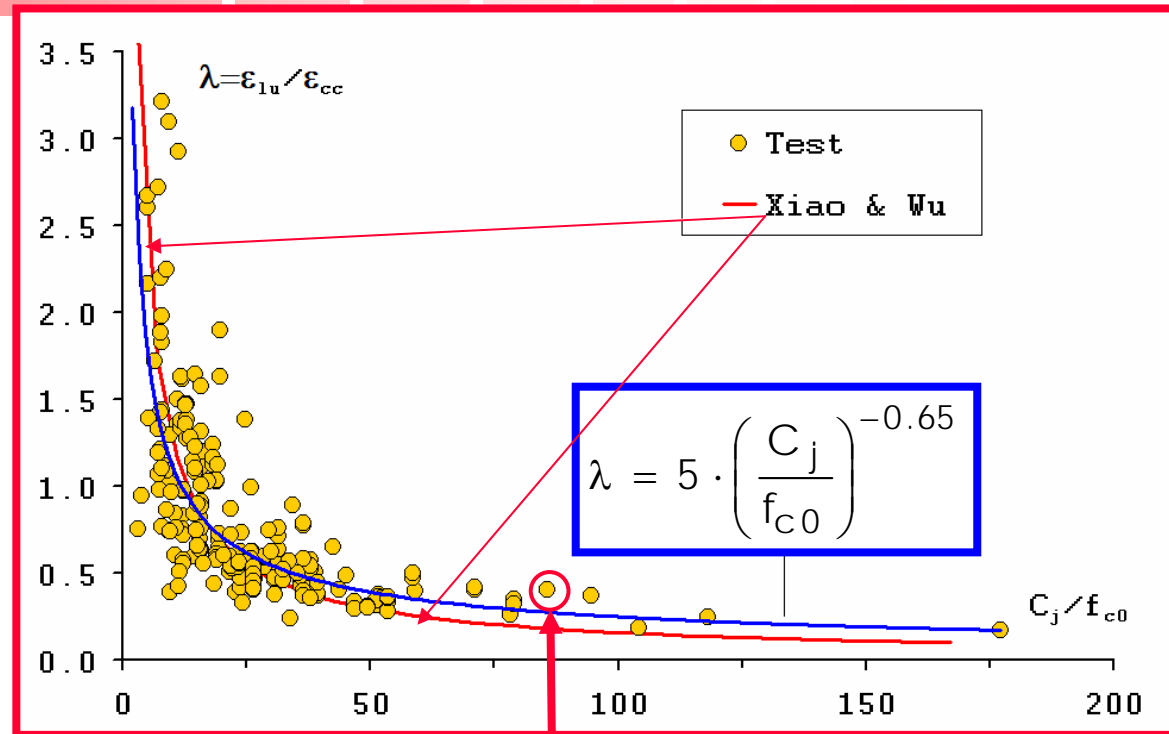
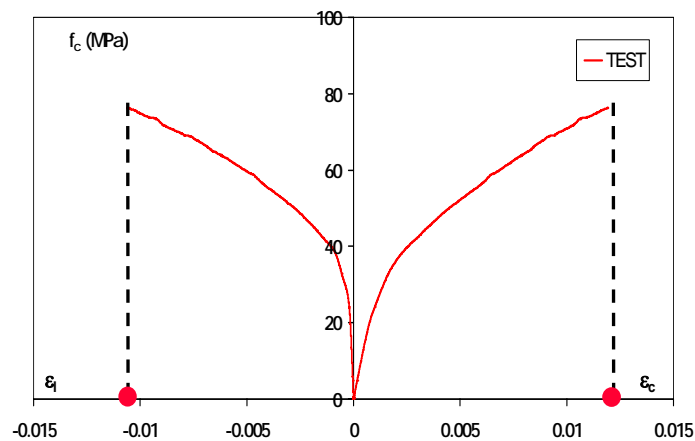
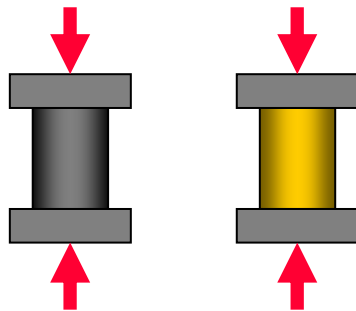


# Stima del parametro $\lambda$

## Risultati test cilindrici

Carbonio

Vetro



$$\frac{\varepsilon_{lu}}{\varepsilon_{cc}}$$

**Popovics senza iterazioni!**



# Una nuova relazione per la stima di $\varepsilon_{cc}$

Sostituendo

$$\lambda = 5 \cdot \left( \frac{C_j}{f_{c0}} \right)^{-0.65}$$

nella relazione

$$\varepsilon_{lu} = \lambda \varepsilon_{cc}$$

si ottiene la seguente espressione:

$$\varepsilon_l = 5 \cdot \left( \frac{C_j}{f_{c0}} \right)^{-0.65} \cdot \varepsilon_c$$

Invertendo tale relazione e ponendo  $\varepsilon_l = \varepsilon_{lu}$  (con  $\varepsilon_{lu}$  deformazione laterale a rottura del sistema confinante in FRP) è possibile ricavare una nuova relazione per la stima della deformazione assiale ultima del calcestruzzo confinato con FRP :

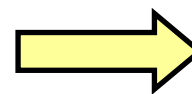
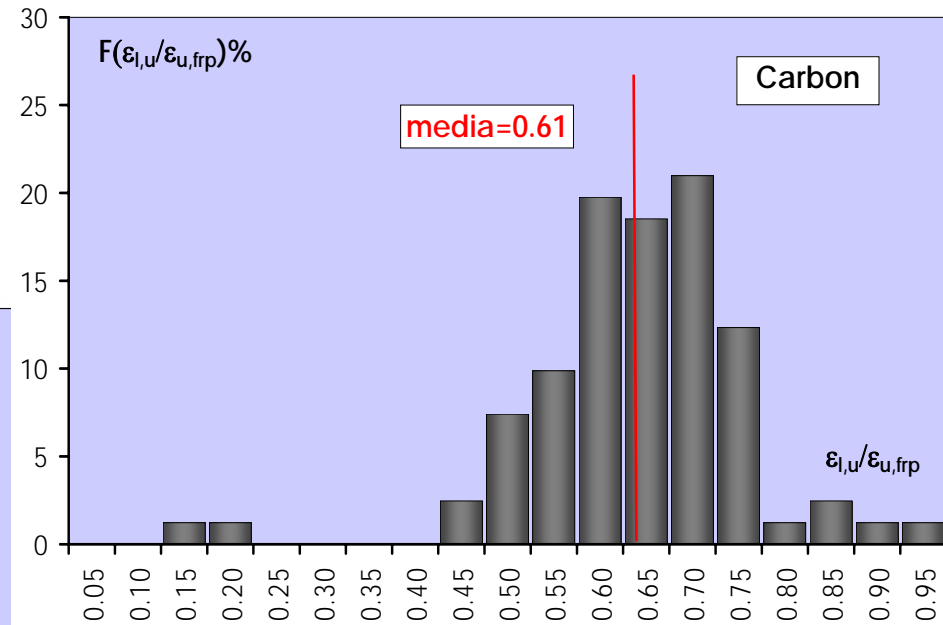
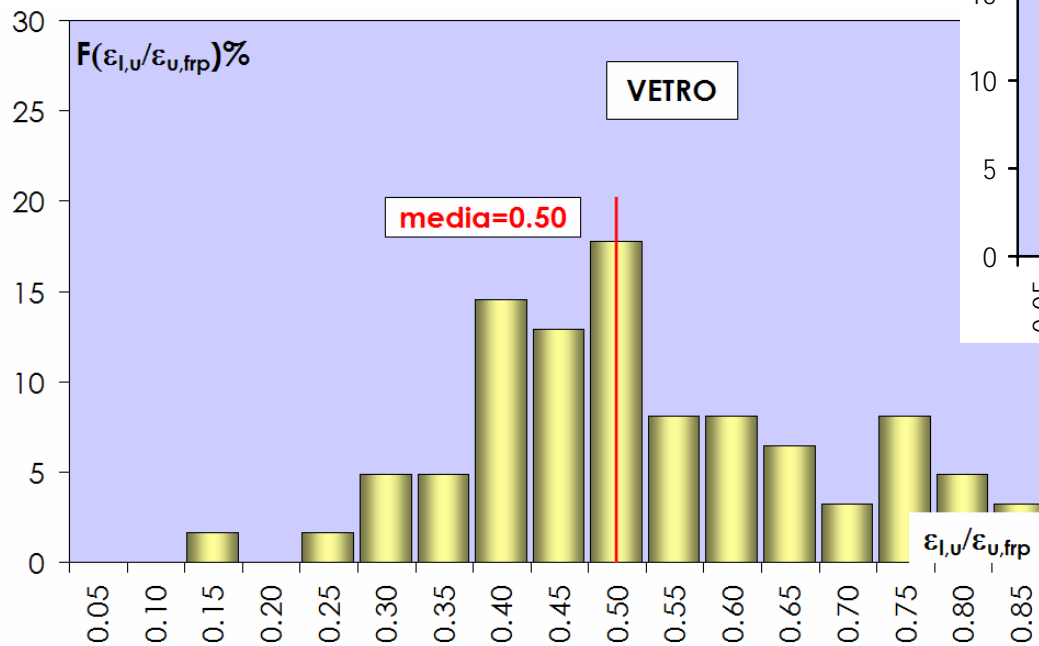
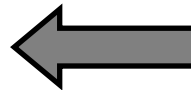
$$\varepsilon_{cc} = \frac{1}{5} \cdot \varepsilon_{lu} \cdot \left( \frac{C_j}{f_{c0}} \right)^{0.65} = 0.2 \cdot \varepsilon_{lu}^{0.35} \cdot \left( \frac{f_l}{f_{c0}} \right)^{0.65}$$



# Stima della deformazione laterale ultima $\epsilon_{lu}$

$$\epsilon_{lu} < \epsilon_{u,frp}$$

$$\epsilon_{lu} = \alpha \cdot \epsilon_{u,frp} \approx 0.61 \cdot \epsilon_{u,frp}$$

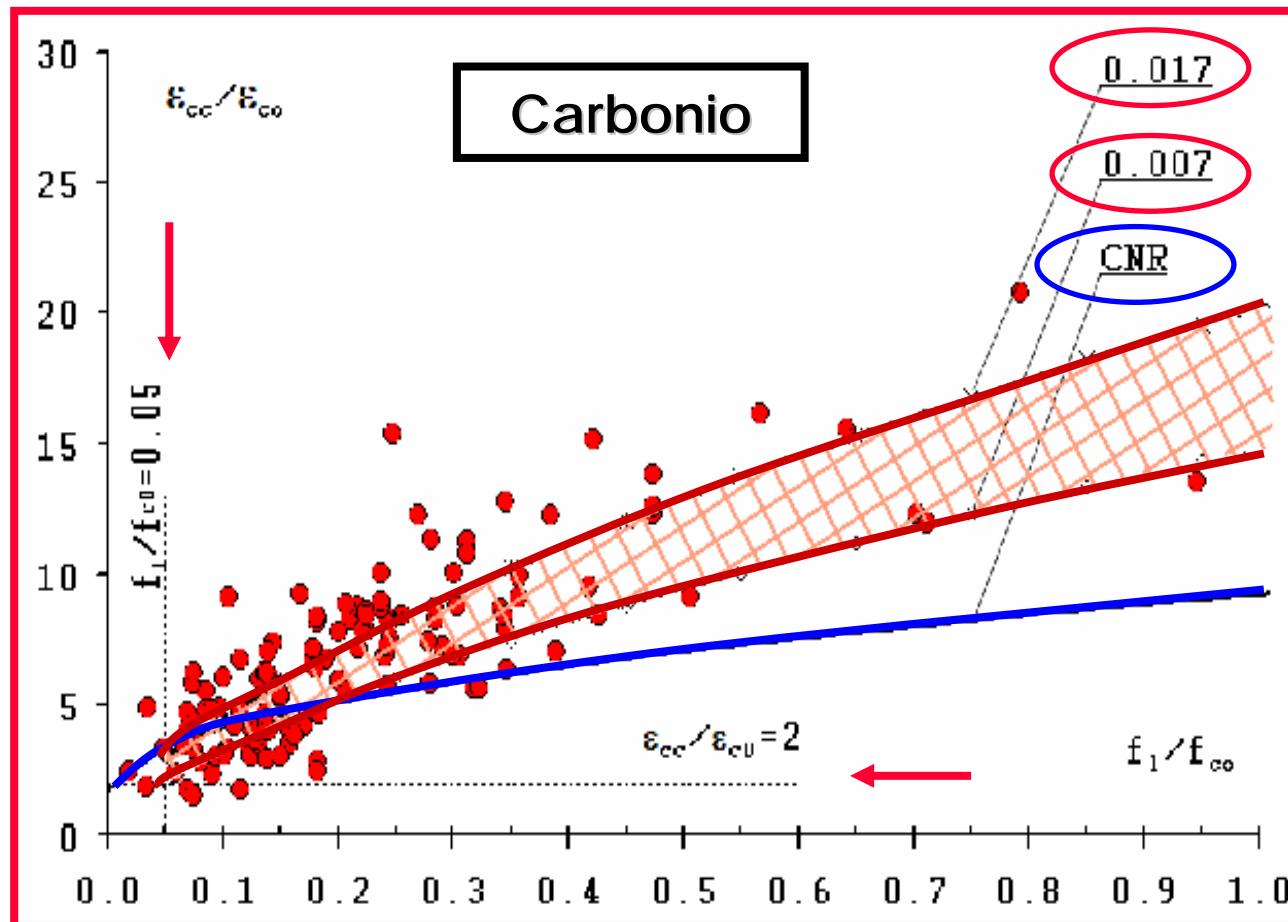


$$\epsilon_{lu} = \alpha \cdot \epsilon_{u,frp} \approx 0.50 \cdot \epsilon_{u,frp}$$



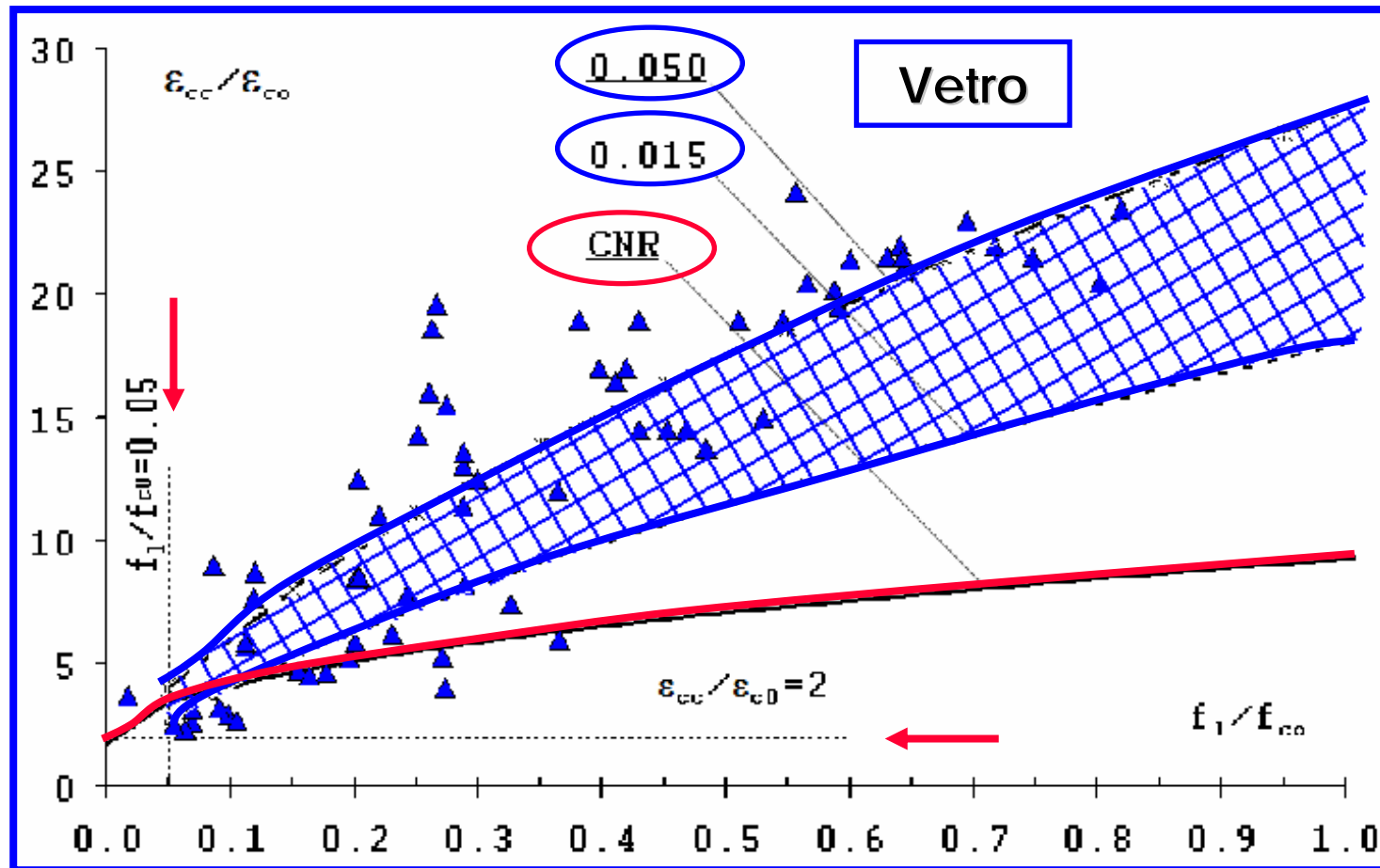
# Grafici $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0}$ vs $f_l/f_{c0}$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 100 \cdot (\alpha \cdot \varepsilon_{u,frp})^{0.35} \cdot \left( \frac{f_l}{f_{c0}} \right)^{0.65}$$





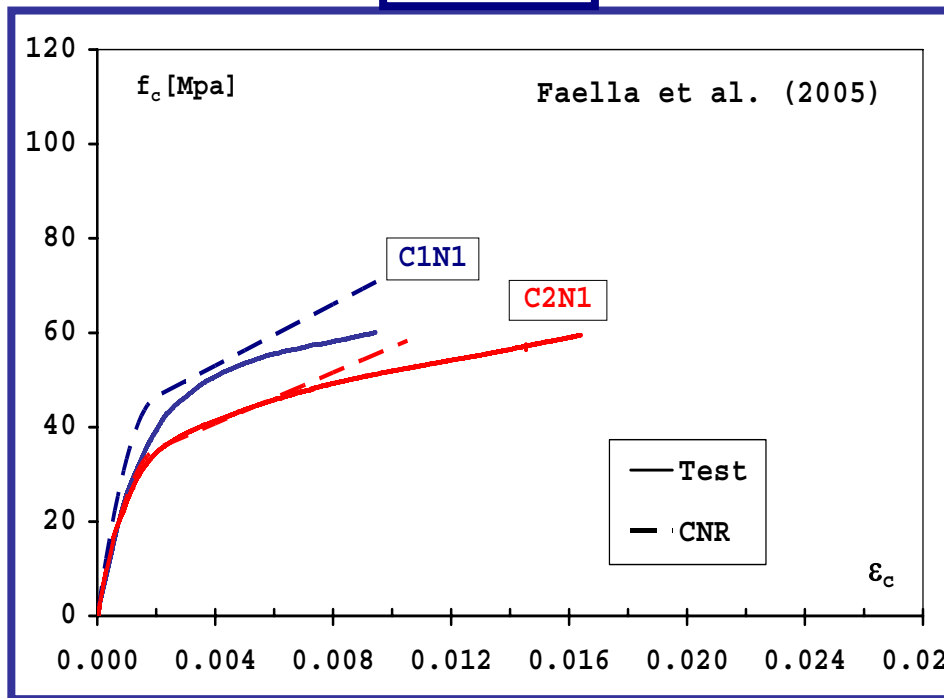
# Grafici $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0}$ vs $f_1/f_{c0}$



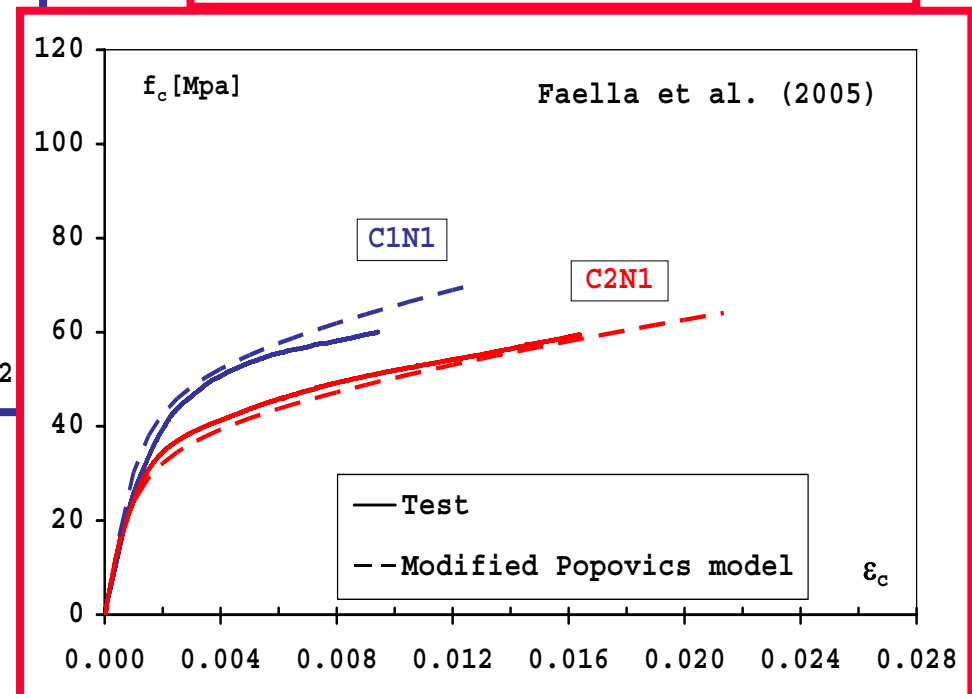


# Confronti numerico-sperimentali

CNR



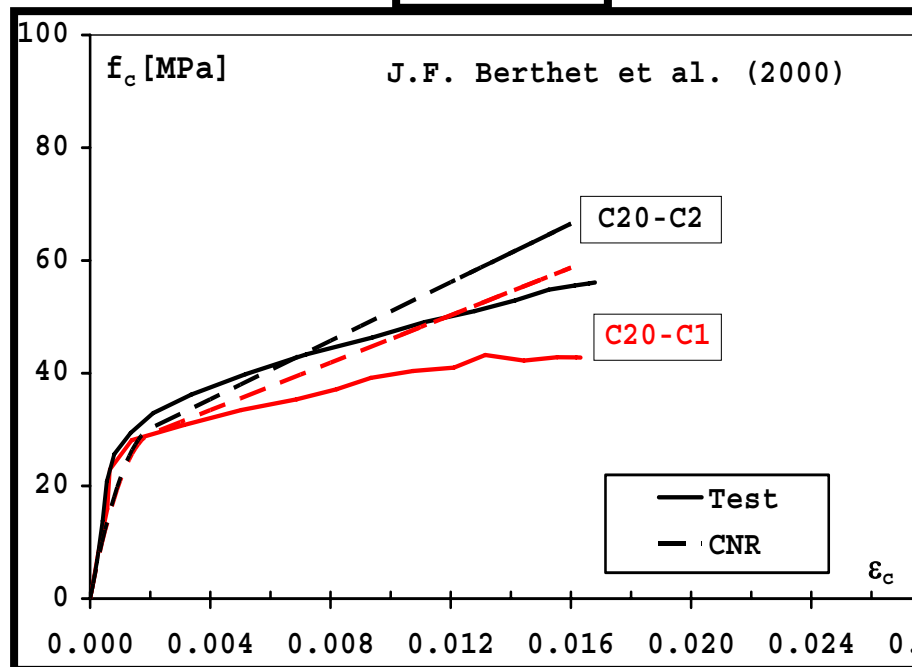
Popovics modificato



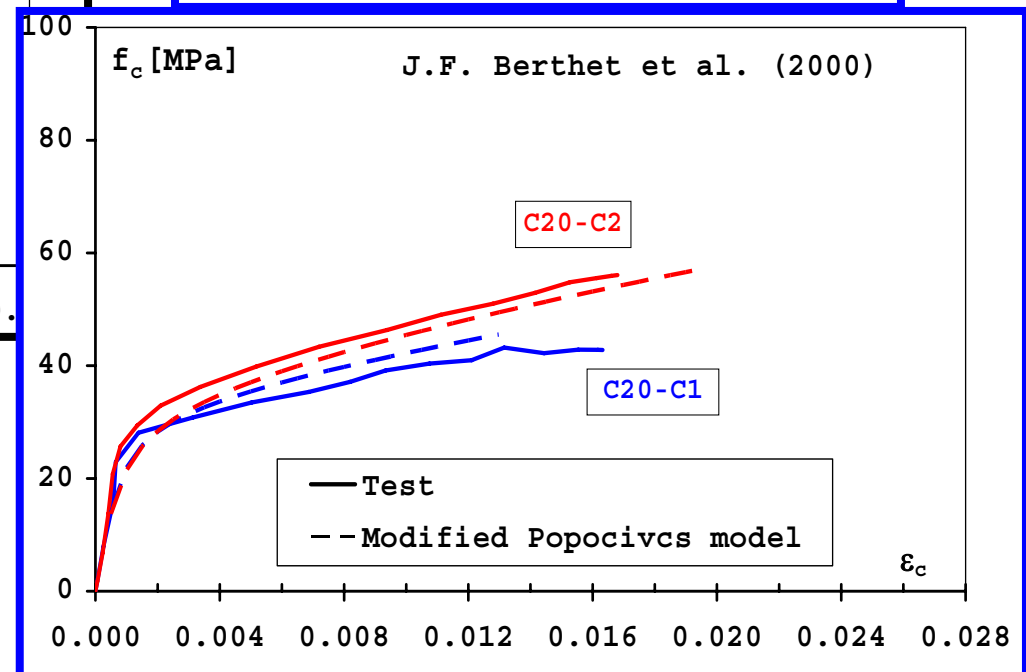


# Confronti numerico-sperimentali

CNR



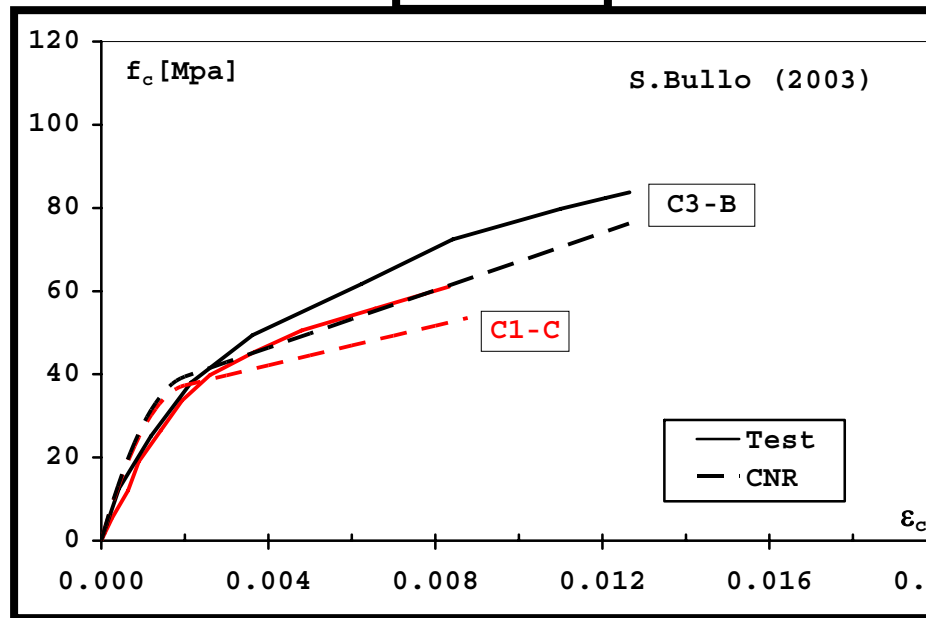
Popovics modificato



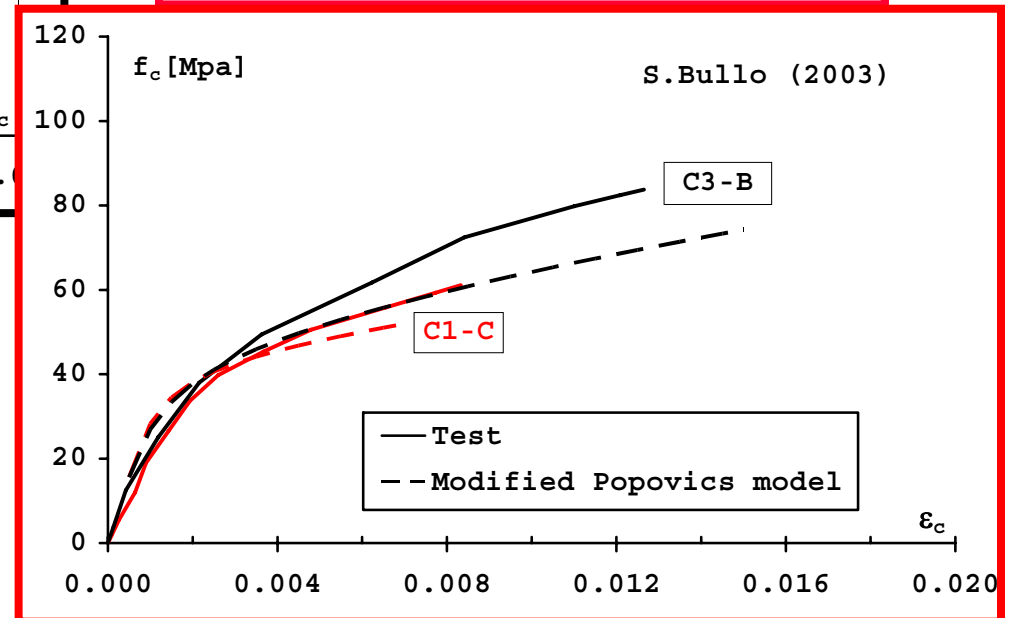


# Confronti numerico-sperimentali

CNR



Popovics modificato







# Conclusioni

- ✓ La relazione proposta per il calcolo della deformazione ultima per la stima della deformazione ultima del calcestruzzo confinato tiene conto del tipo di materiale;
- ✓ La stessa relazione, confrontata con quella fornita dal DT200, ne mette in evidenza l'eccessiva conservatività;
- ✓ La procedura semplificata proposta per l'implementazione del legame di Popovics, con la valutazione della deformazione  $\varepsilon_{cc}$  secondo la relazione proposta, fornisce una buona previsione dei risultati sperimentali.



***GRAZIE PER LA CORTESE  
ATTENZIONE***

