

# IL CNR DT-200/2004

## Progettazione di rinforzi con FRP

Una introduzione

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA  
STRUTTURALE E GEOTECNICA



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

Giorgio Monti  
*Ordinario di Tecnica delle Costruzioni*



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# IL RINFORZO DELLE STRUTTURE CON FRP

**Giorgio Monti**

( [giorgio.monti@uniroma1.it](mailto:giorgio.monti@uniroma1.it) )



## Testo di riferimento

### **Documento CNR-DT 200/2004**

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

**Materiali, strutture in c.a. ed in c.a.p.,  
strutture murarie**

**Disponibile sul sito del CNR: [www.cnr.it](http://www.cnr.it)**



# COMPORTAMENTO STRUTTURALE INADEGUATO



Taglio nelle travi



Taglio nei pilastri



Aderenza nei pilastri



Taglio nei pilastri

Sisma di Michoacán, 1985



# COMPORTAMENTO STRUTTURALE INADEGUATO



**Collasso per taglio dei pilastri**

**Edificio della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Tohoku**

**Sisma di Miyagi-oki, 1968**

Foto: cortesia del Prof. Kikuchi K.

# STUDIO SPERIMENTALE (pilastri corti)

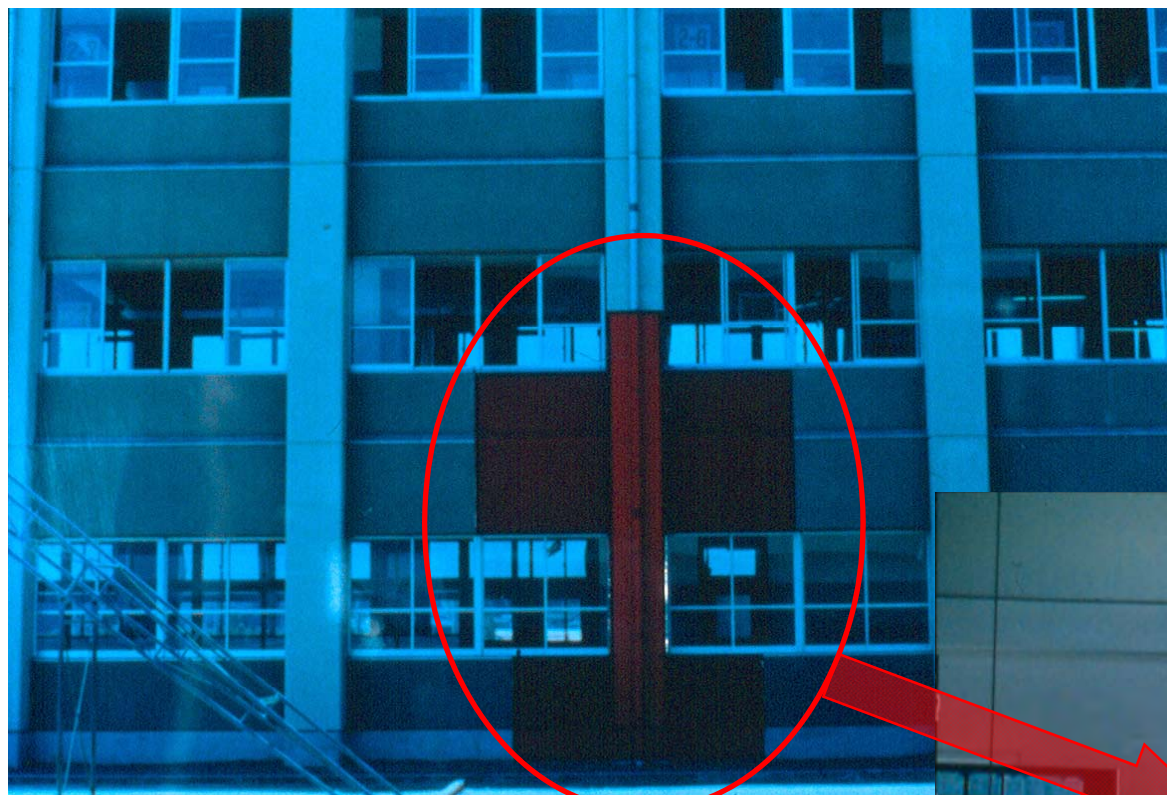


Foto: cortesia del Prof. Kikuchi K.

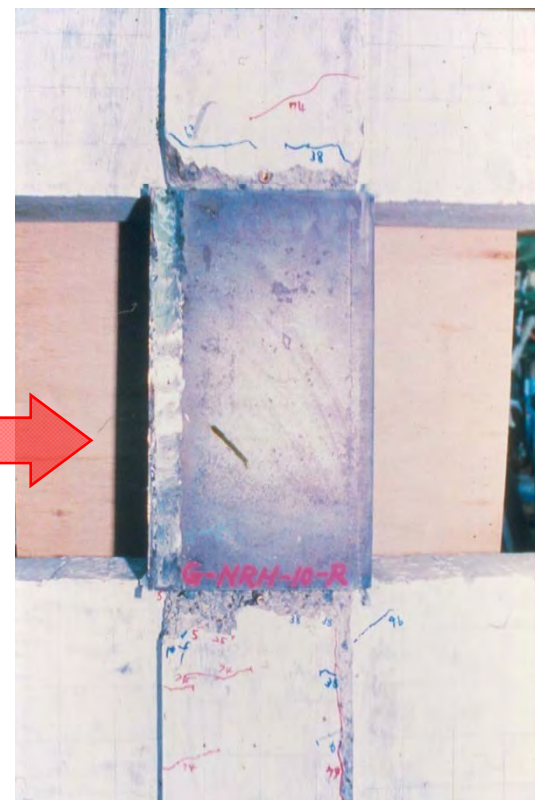
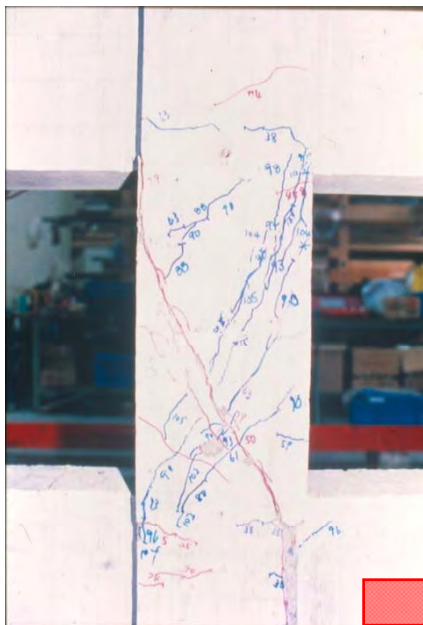
Laboratorio dell'Università di  
Oita, Giappone

Modello estratto da un edificio  
con propensione al collasso  
per taglio dei pilastri





# STUDIO SPERIMENTALE (pilastri corti)

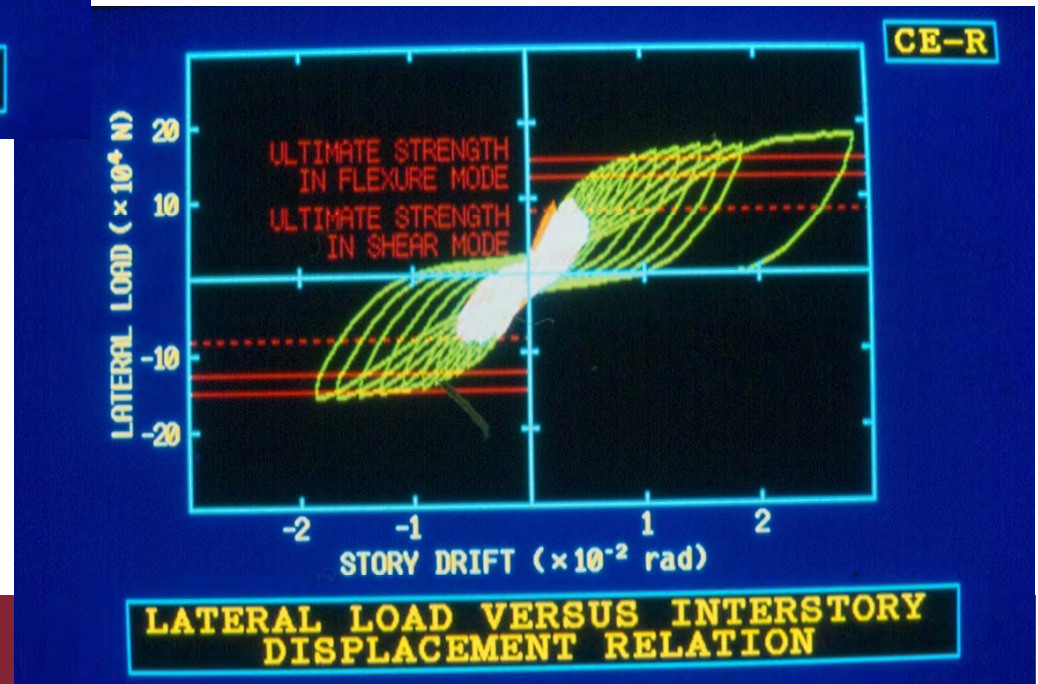
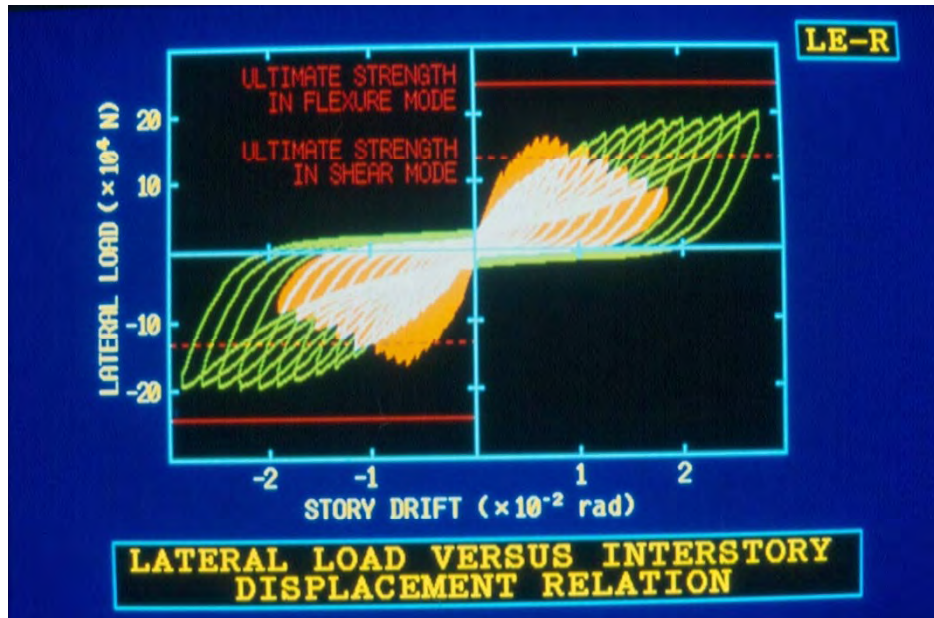


**Rinforzo mediante incamiciature metalliche**

Foto: cortesia del Prof. Kikuchi K.



# STUDIO SPERIMENTALE (pilastri corti)



# APPLICAZIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI



Foto: cortesia del Prof. Yoshimura H.





# PROCEDURA DI RINFORZO



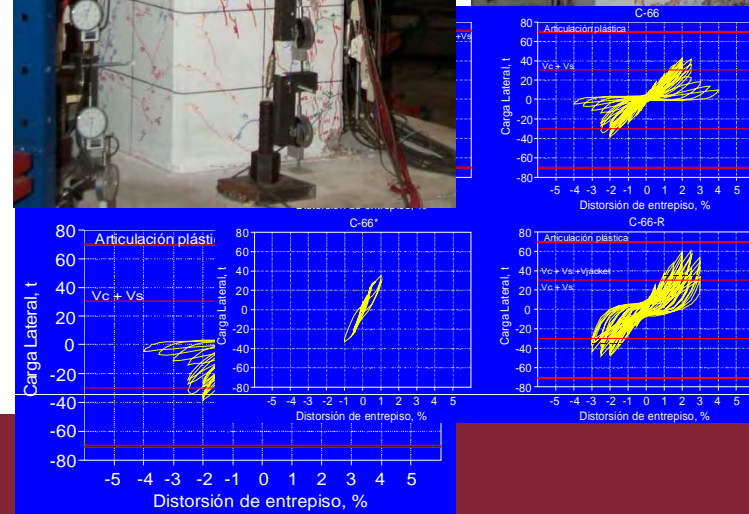
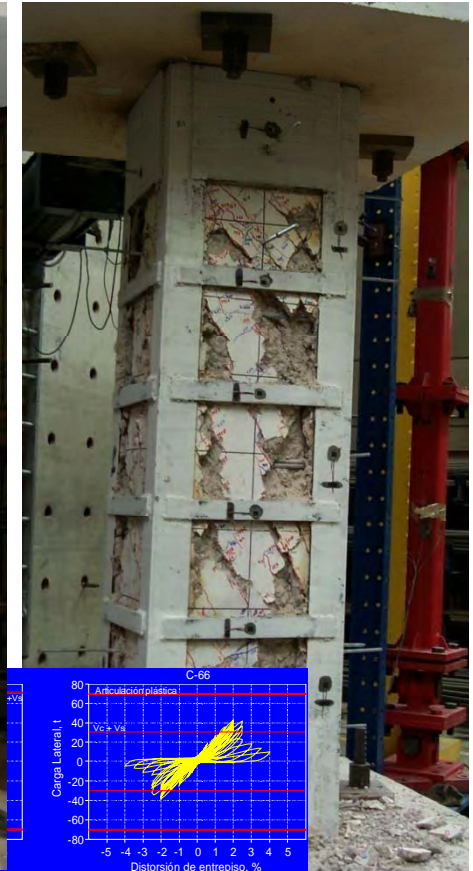
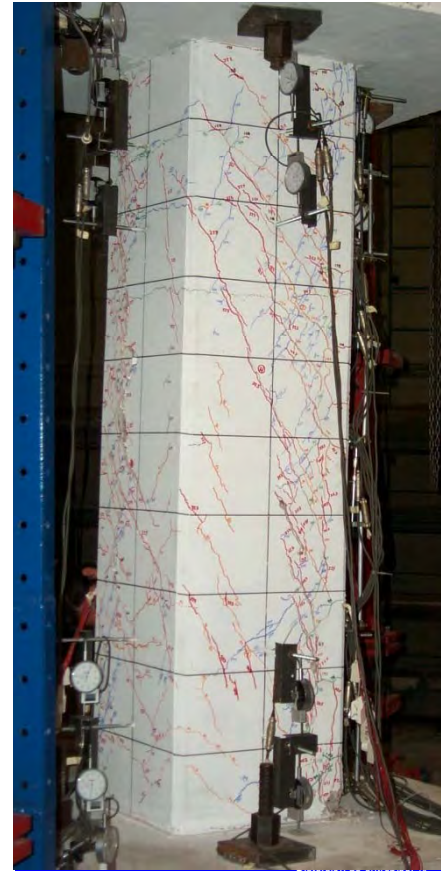
**Incamiciatura in c.a.:**  
**bassi costi?**





# PROCEDURA DI RINFORZO

Incamiciatura in acciaio:  
efficiente?, pratica?





# CONTROVENTAMENTI IN ACCIAIO



# CONTROVENTAMENTI IN ACCIAIO





# CONTROVENTAMENTI IN ACCIAIO

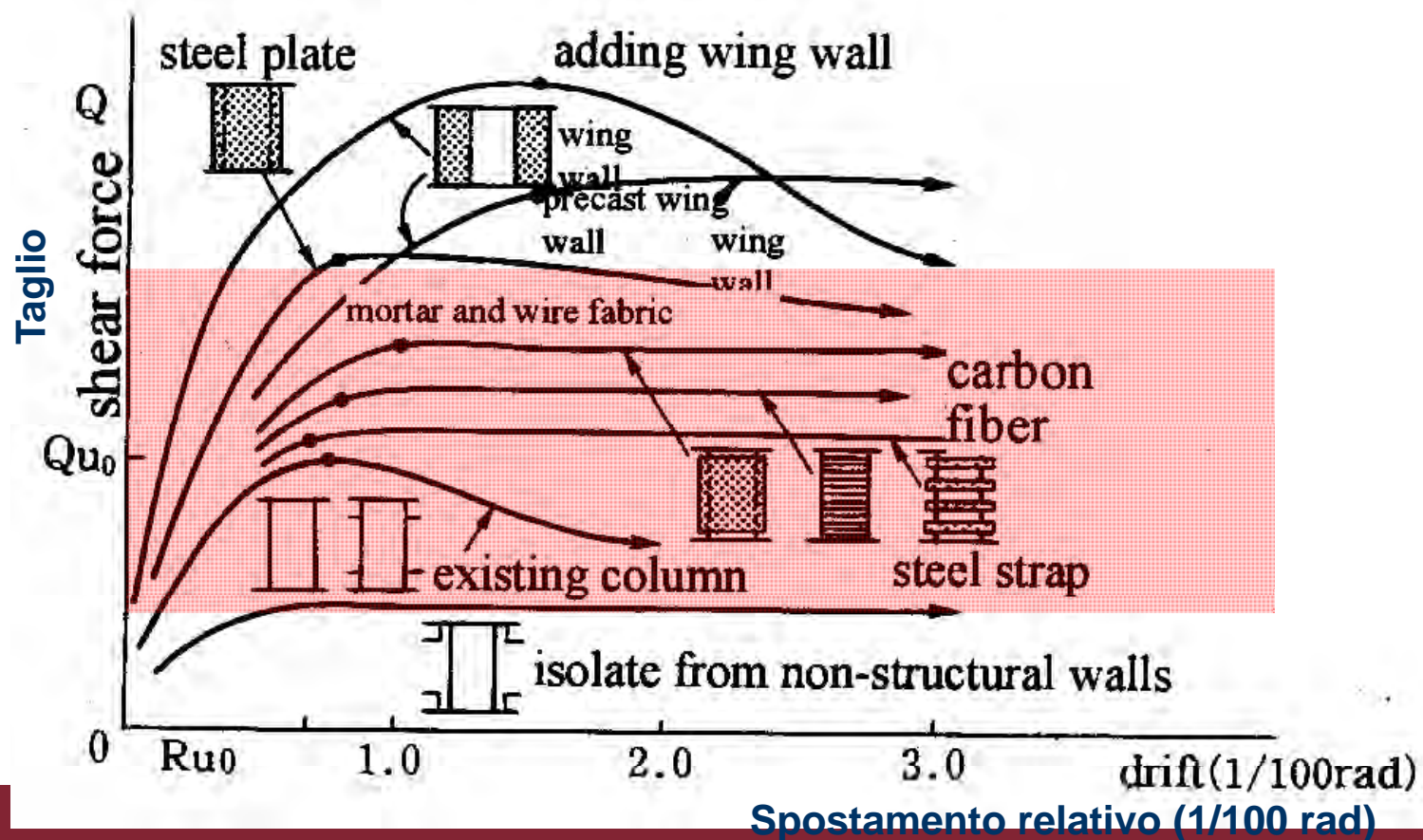


# STUDI SPERIMENTALI



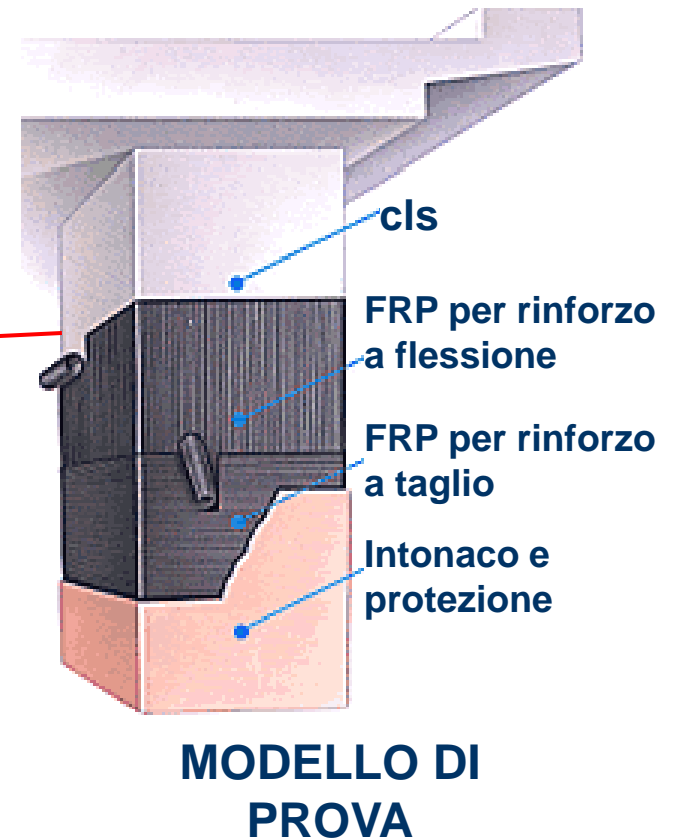
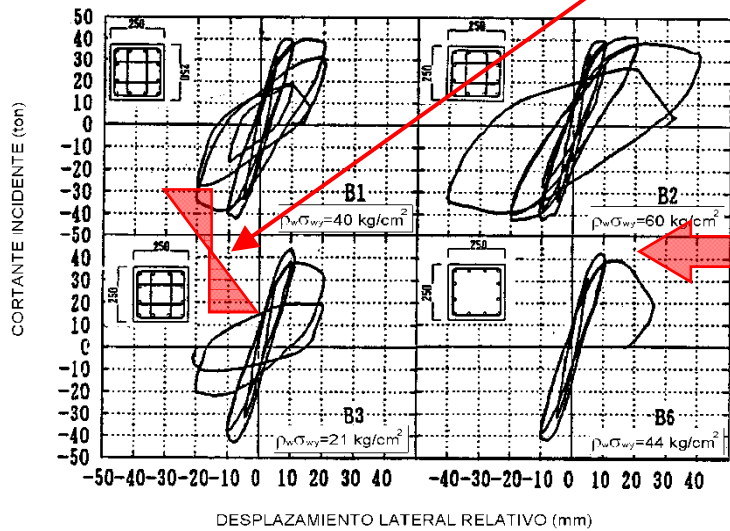
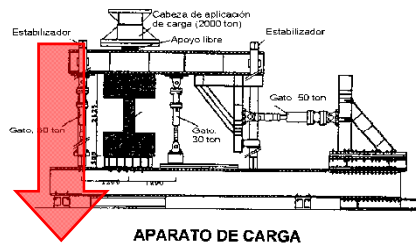
# STUDIO SPERIMENTALE (pilastri)

Effetti di diverse strategie di rinforzo di pilastri osservati in vari lavori sperimentali (da: "Design and Construction Guideline of Continuous Fiber Reinforced Concrete")



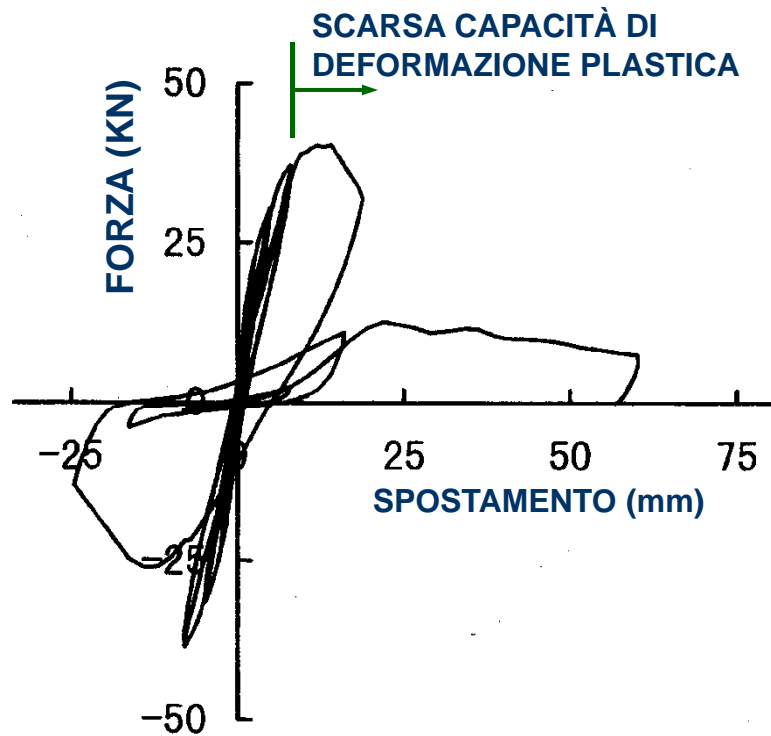


# STUDIO SPERIMENTALE (pilastri)

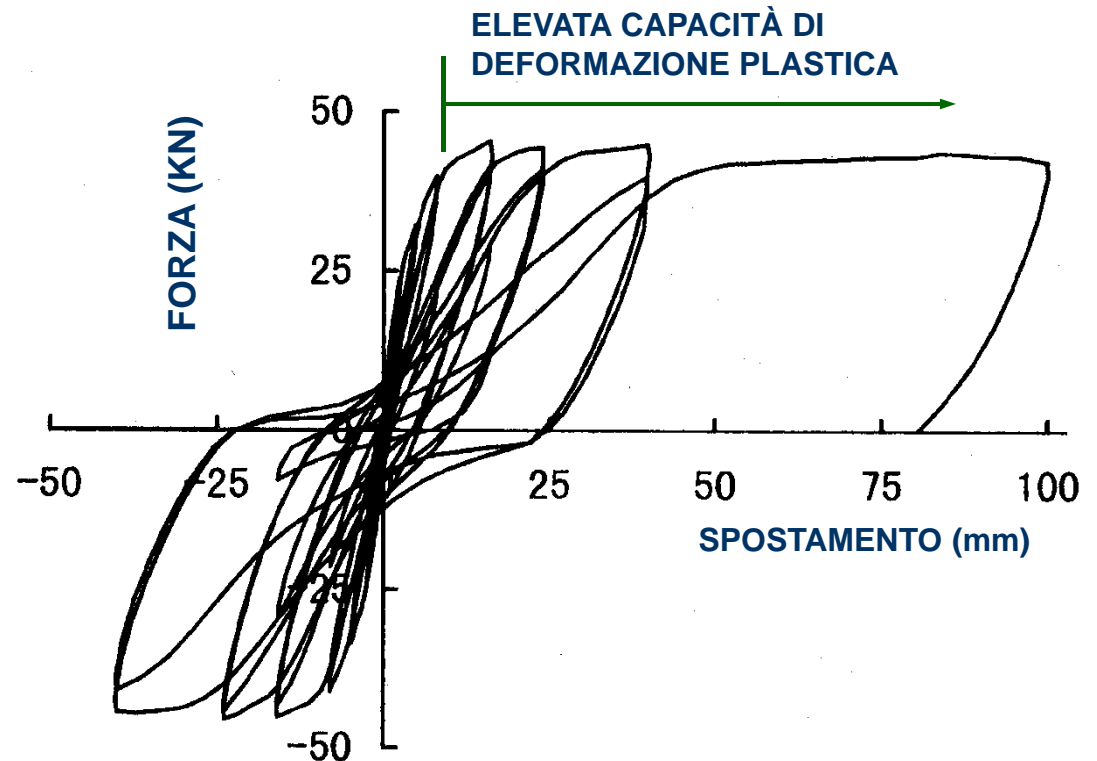


# STUDIO SPERIMENTALE CON FRP

## COMPORTAMENTO DI PILASTRI SOTTO CARICO CICLICO LATERALE CON E SENZA RINFORZO A TAGLIO IN FRP



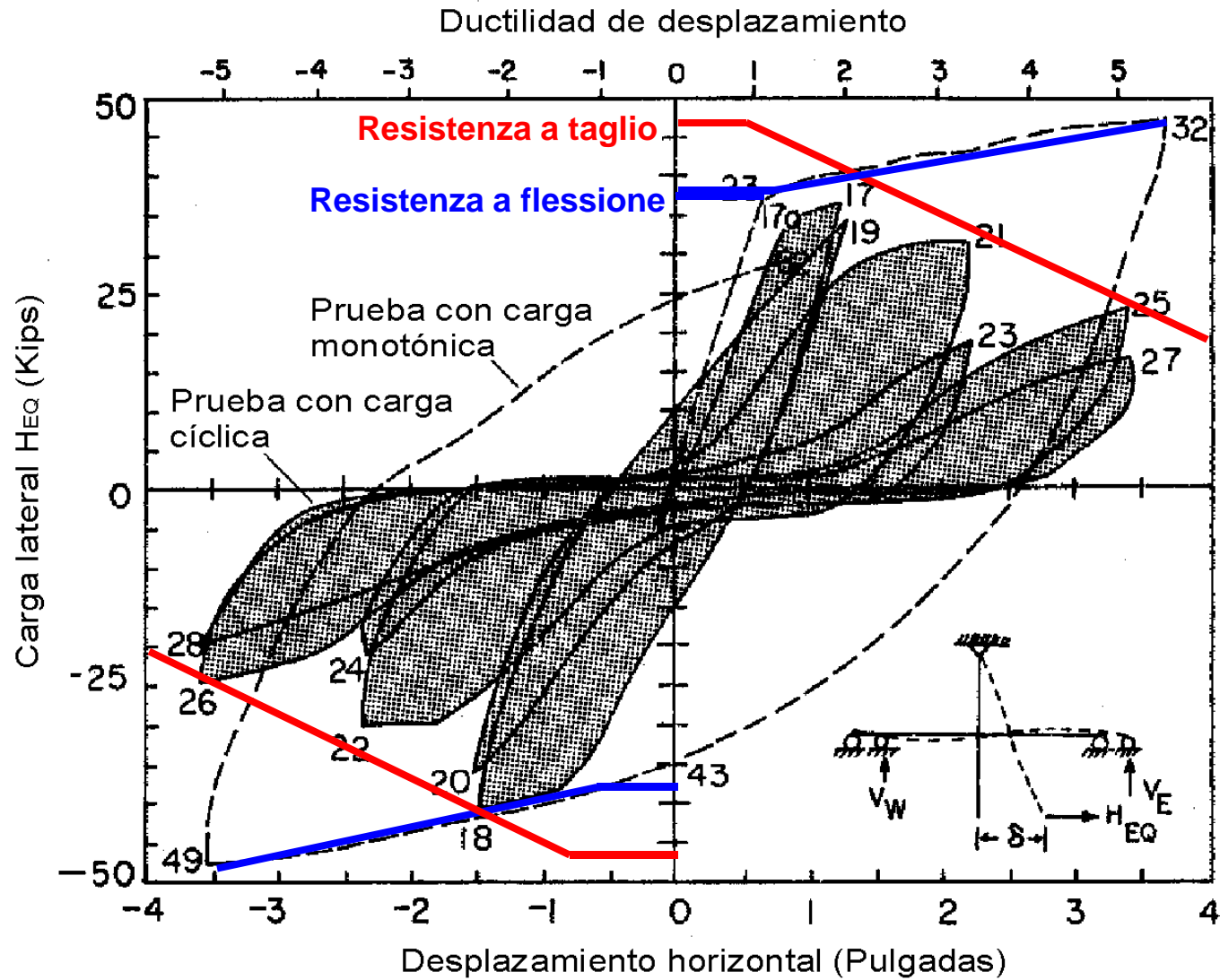
PILASTRO NON RINFORZATO  
(PROGETTATO CON NORME VECCHIE)



PILASTRO CON RINFORZO IN FRP

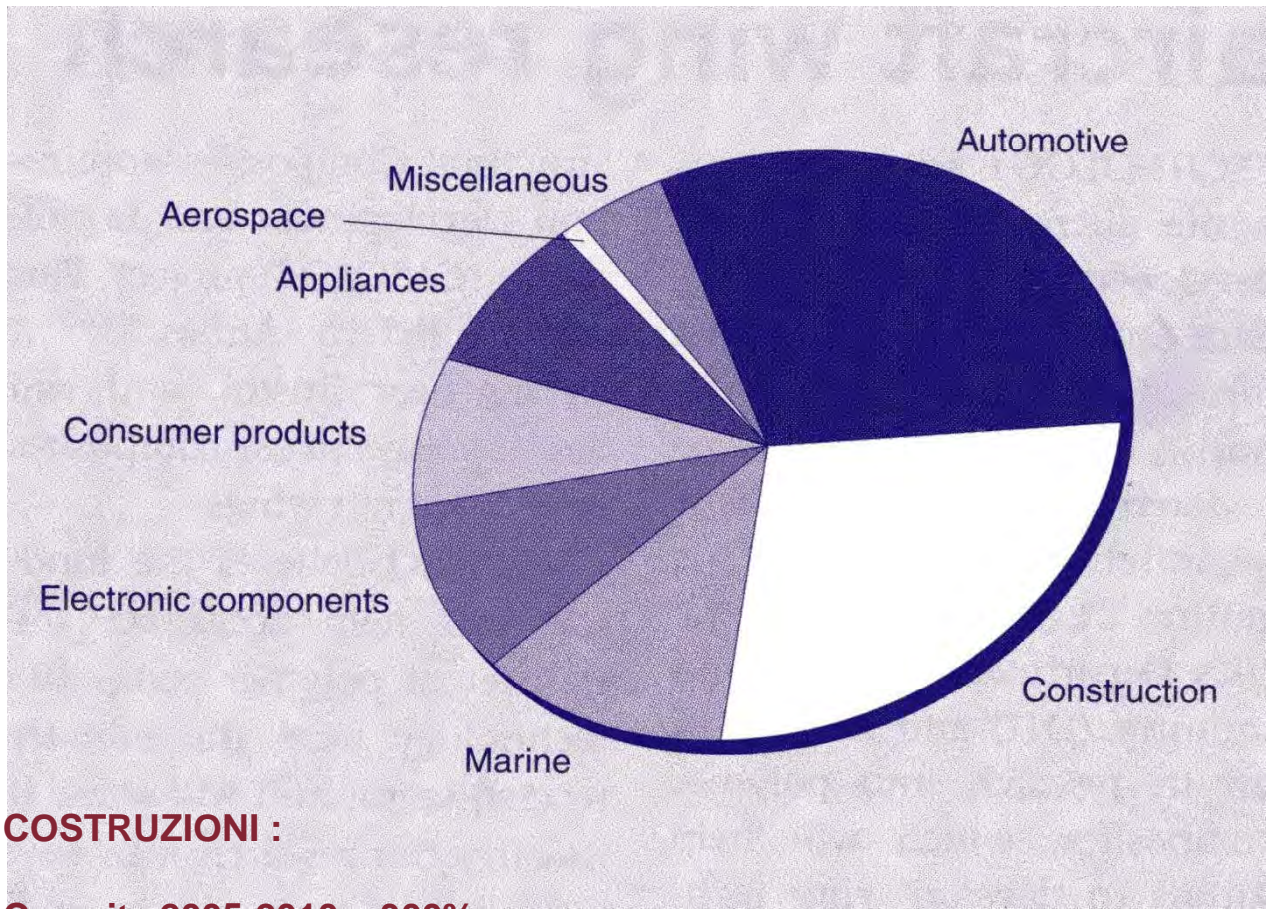


# VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ DEFORMATIVA



# IL MATERIALE FRP





**COSTRUZIONI :**

**Crescita 2005-2010 ~ 300%**

**\$45 MLD in USA nel 2003**

**(21% nel rinforzo)**

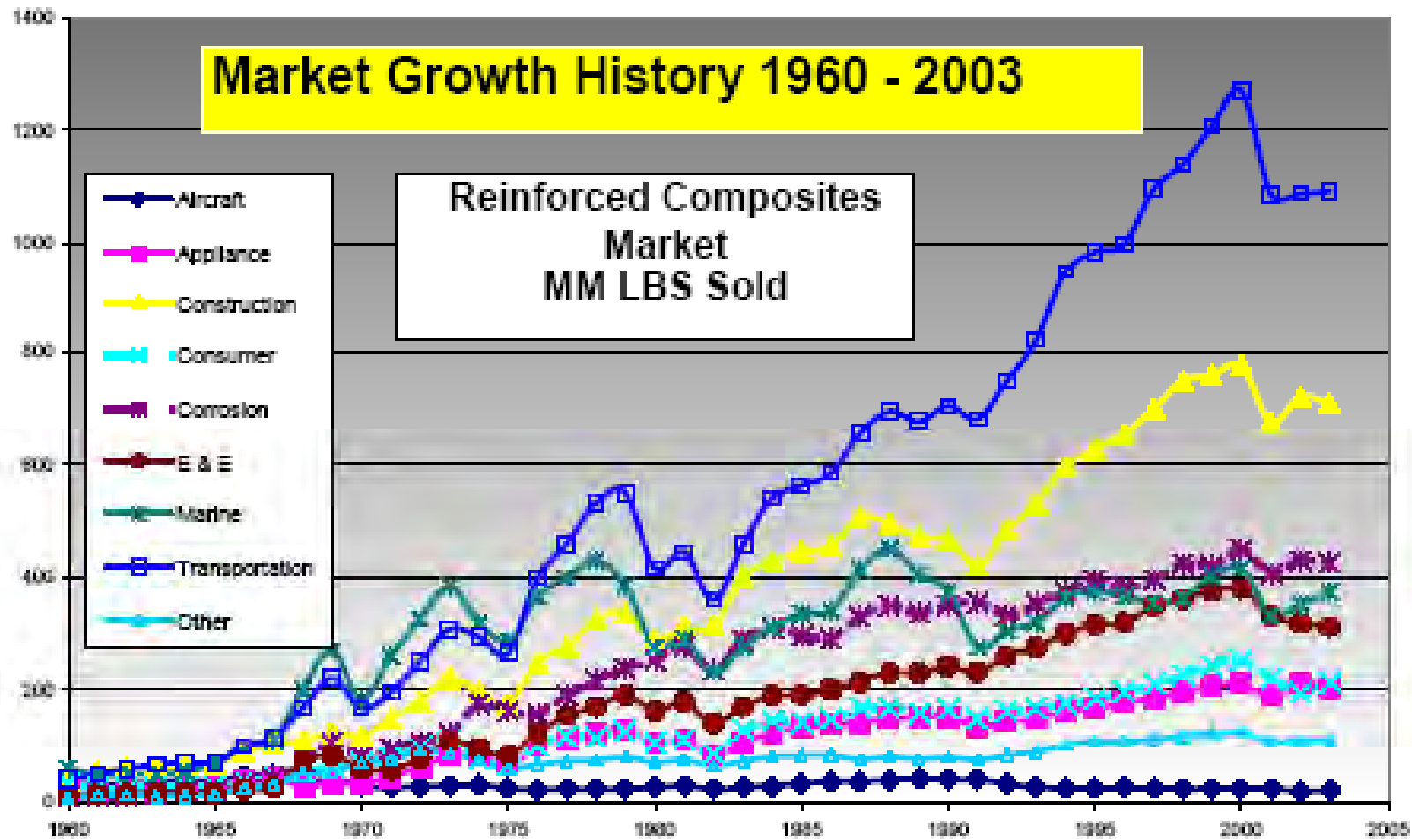
**600.000 m<sup>2</sup> in Cina nel 2003**

**Consumo annuo**

**300.000 ton nel 2007**

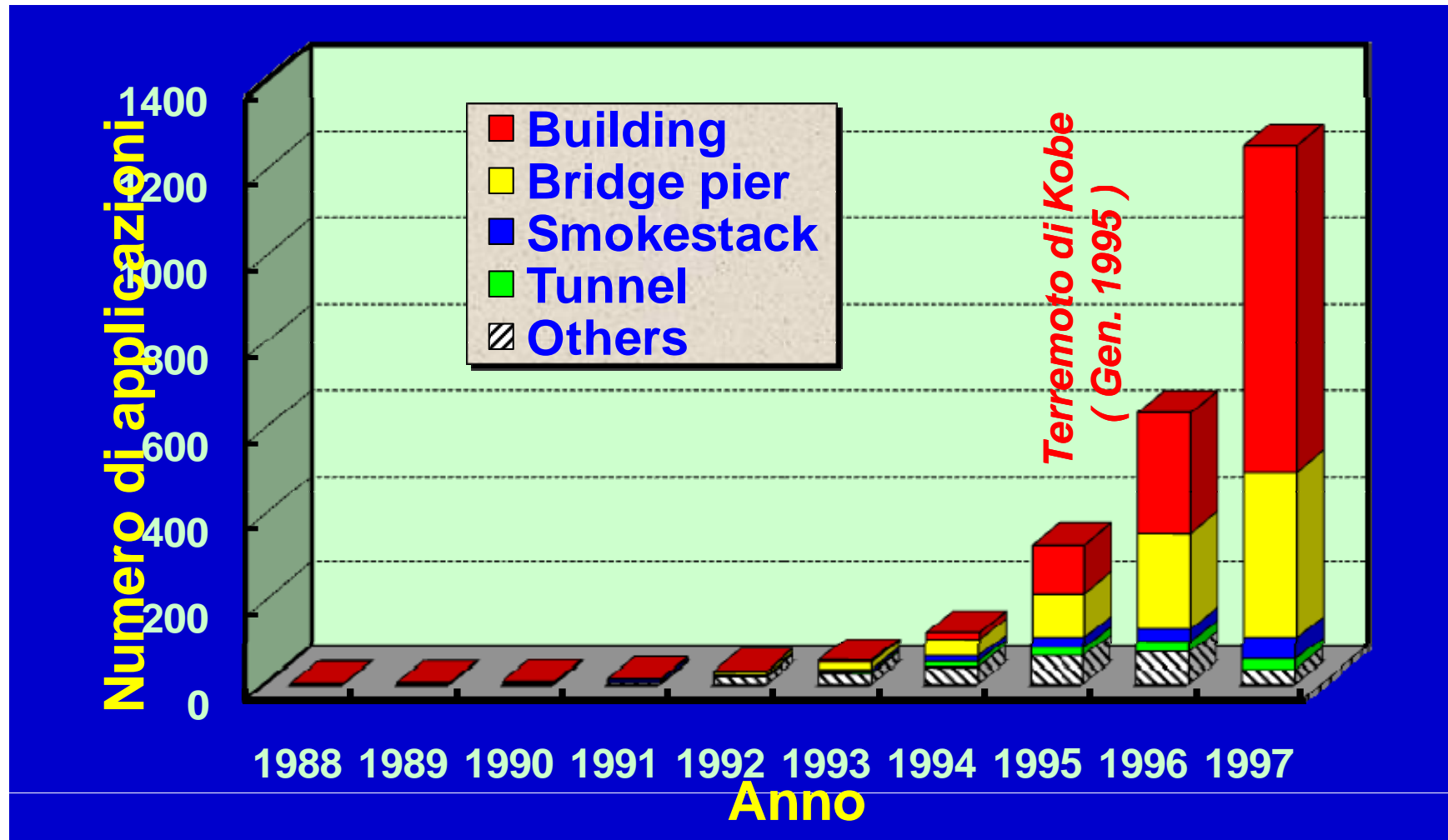


# Crecita del mercado



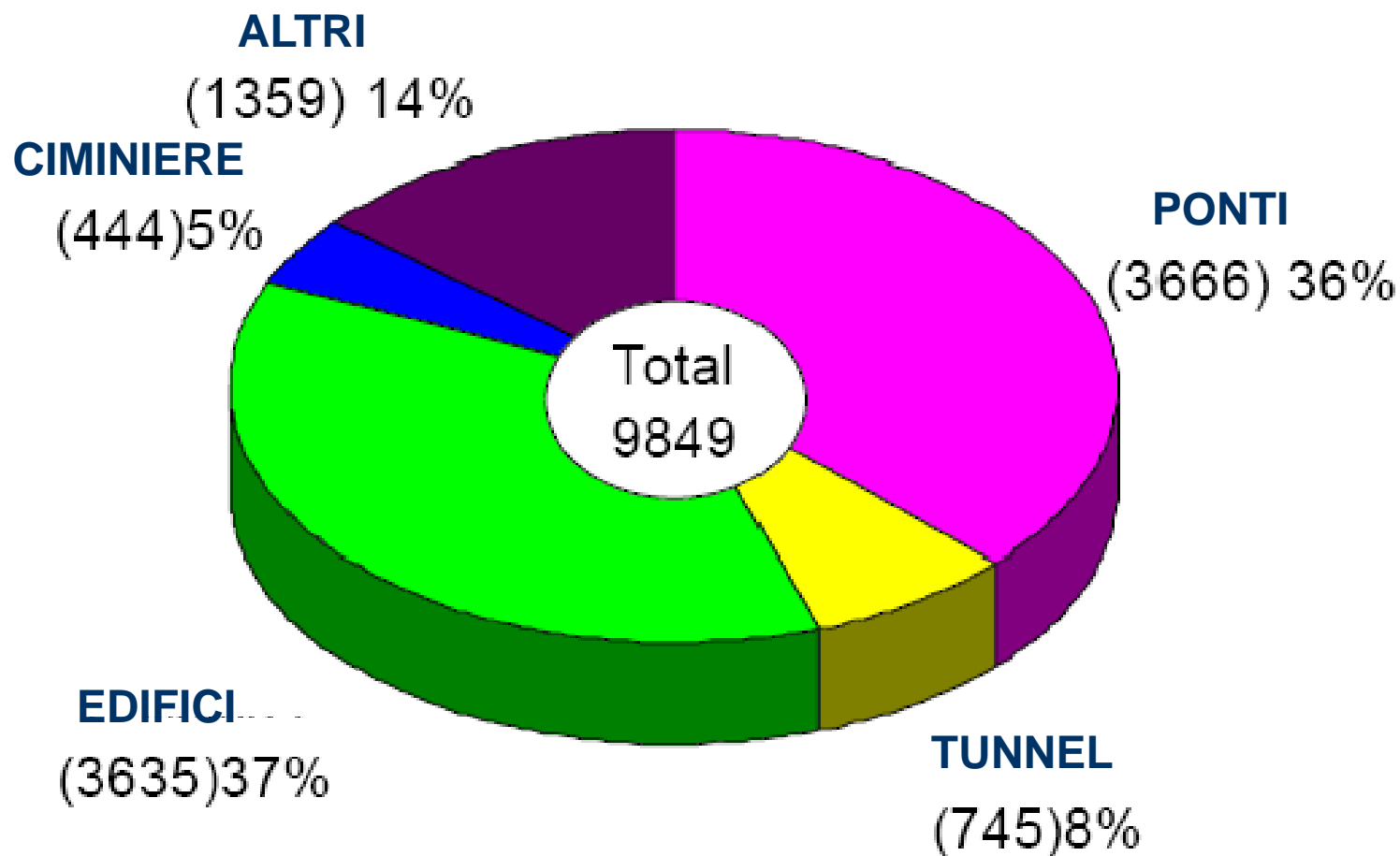


# In Giappone ...



# STATO ATTUALE DELL'USO DI FRP IN GIAPPONE

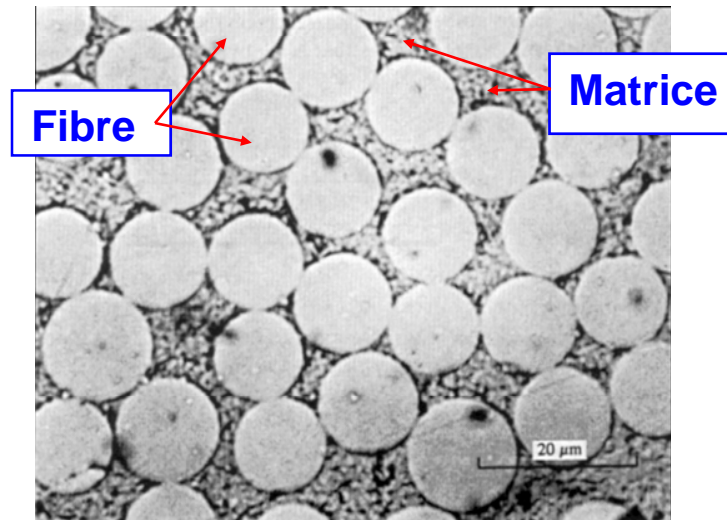
## NUMERO DI INTERVENTI





## Il materiale FRP

- L'FRP è un materiale composito
- E' formato da due fasi:
  - **Matrice** (solitamente una resina)
  - **Rinforzo** (sempre in fibre. Es: di vetro, di carbonio)



## Il materiale FRP

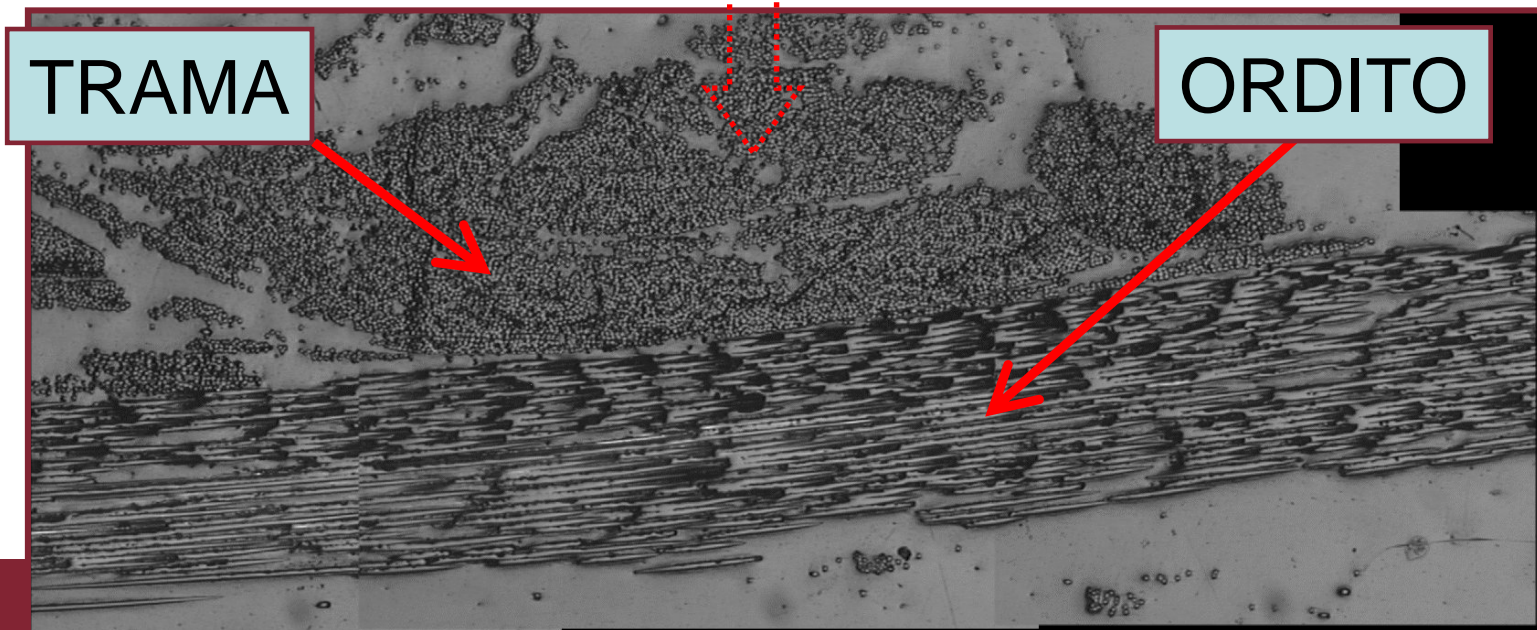
- L'FRP è un materiale composito
- E' formato da due fasi:
  - **Matrice** (solitamente una resina)
  - **Rinforzo** (sempre in fibre. Es: di vetro, di carbonio)
- Microscopicamente: due fasi distinguibili
- Macroscopicamente: è un materiale omogeneo
- Si ottiene impregnando i rinforzi nella matrice ed attendendo l'essiccazione (polimerizzazione)
- Consente una **progettazione multiscala**

# Progettazione multiscala





## Sezione trasversale di un tessuto impregnato



## Dimensioni dei compositi

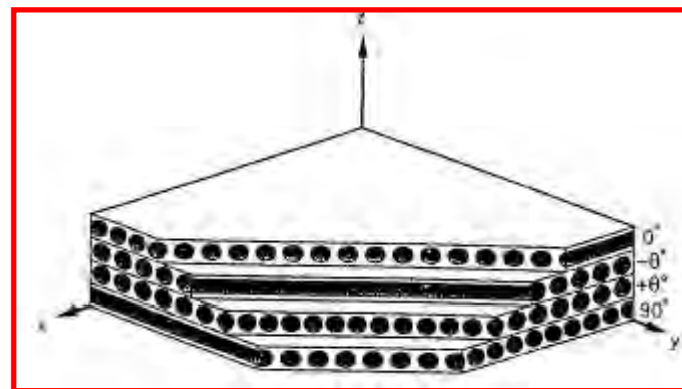
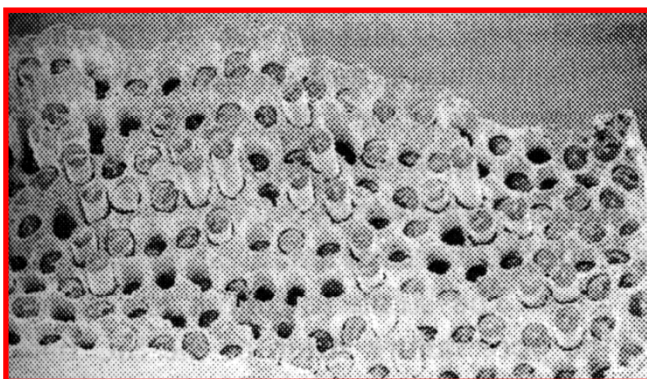


Tabella 2-2 – Scala dei compositi fibrosi a matrice polimerica.

	dimensioni rappresentative					
	pm	nm	$\mu\text{m}$	mm	m	km
Atomo	*	*				
Molecole polimeriche		*	*			
Polimeri biologici		*	*			
Cristalliti			*	*		
Sferuliti			*	*		
Diametro delle fibre			*			
Spessore lamina			*	*	*	
Spessore laminati				*	*	
Lunghezza laminati					*	*
Strutture						*

# Proprietà delle fibre di rinforzo, delle matrici più comuni e dell'acciaio da costruzione (valori indicativi)

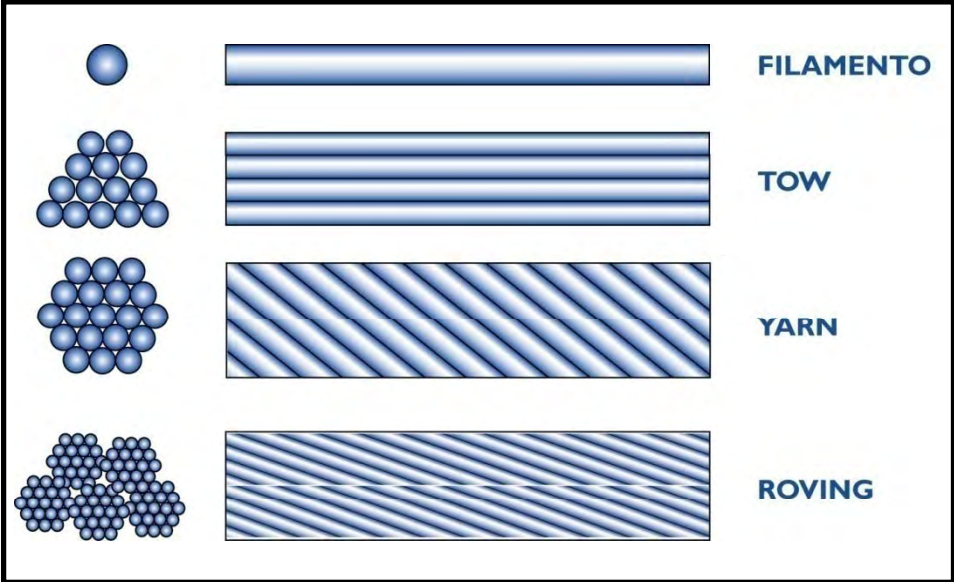
	Modulo elastico $E$	Resistenza	Deformazione a rottura	Coefficiente di dilatazione termica	Densità
	[GPa]	[MPa]	[%]	[ $10^{-6} \text{ } ^\circ \text{C}^{-1}$ ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
fibre di vetro E	72 – 80	3400	4.8	5 – 5.4	2.5 – 2.6
fibre di vetro S	85	4500	5.4	1.6 – 2.9	2.46 – 2.49
fibre di carbonio (alto modulo)	390 – 760	2400 – 3400	0.5 – 0.8	-1.45	1.85 – 1.9
fibre di carbonio (alta resistenza)	240 – 280	4100 – 5100	1.6 – 1.73	-0.6 – -0.9	1.75
fibre aramidiche	60 – 180	3600 – 3800	1.9 – 5.5	-2	1.45 – 1.48
matrice polimerica	2.7 – 3.6	40 – 82	1.4 – 5.2	30 – 54	1.10 – 1.25
acciaio da costruzione	210	250 – 400 (snervamento) 350 – 600 (rottura)	20 – 30	10.4	7.8



## Tipologie di filati

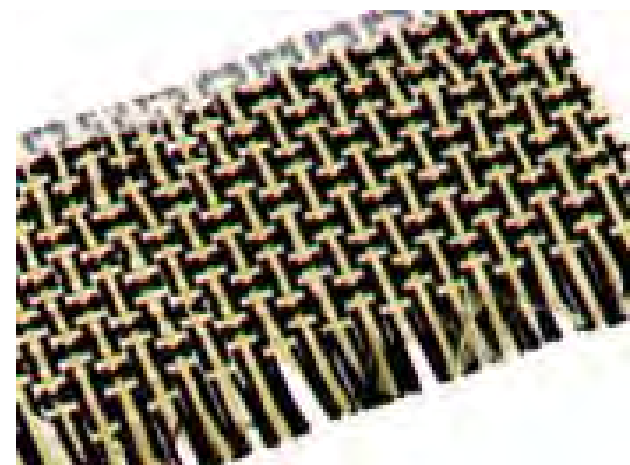
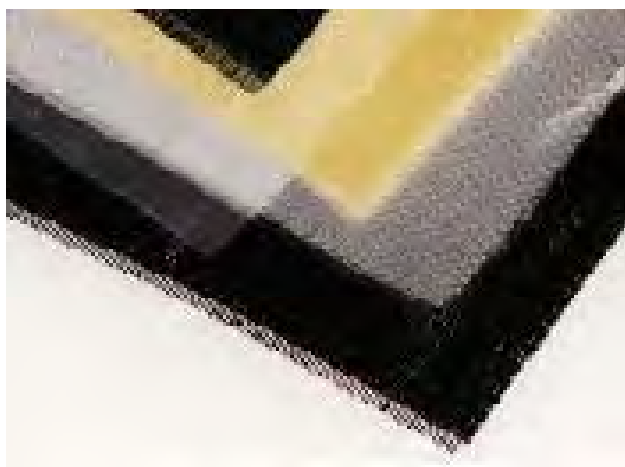
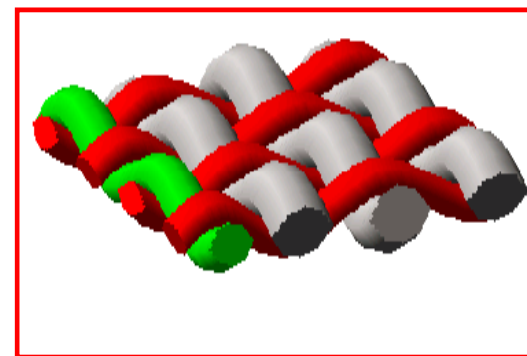
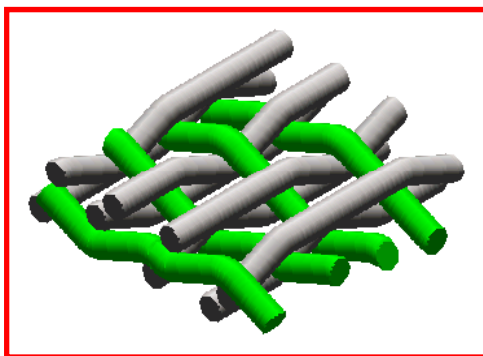
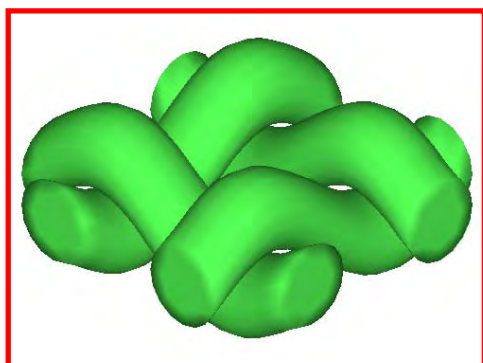


# Tipologie di filati



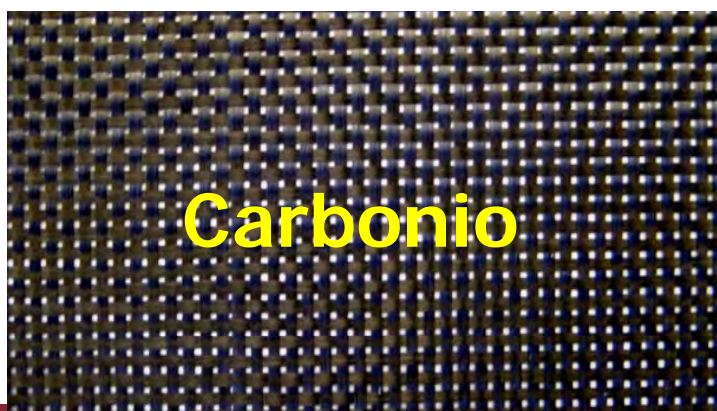
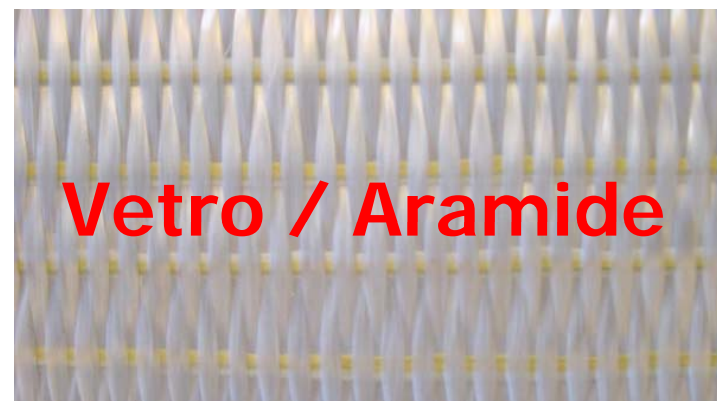
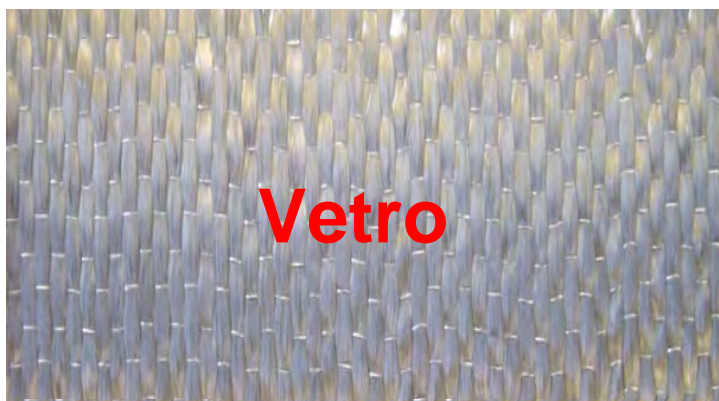
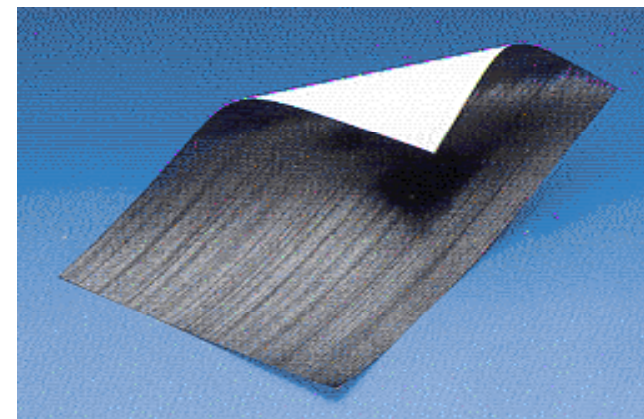
## I tessuti

- Si ottengono intrecciando le fibre

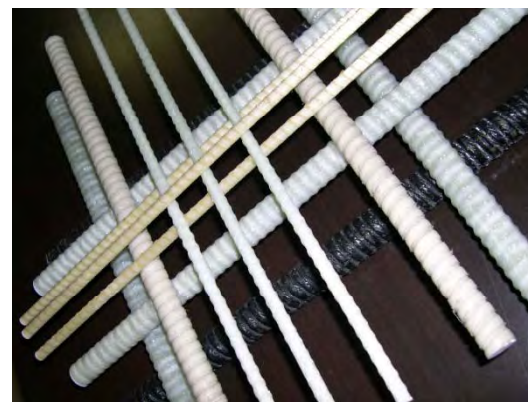




# I tessuti

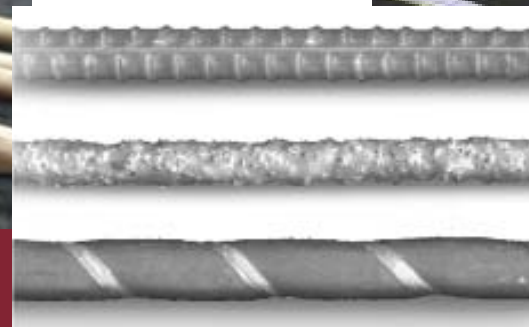


## Le barre in FRP

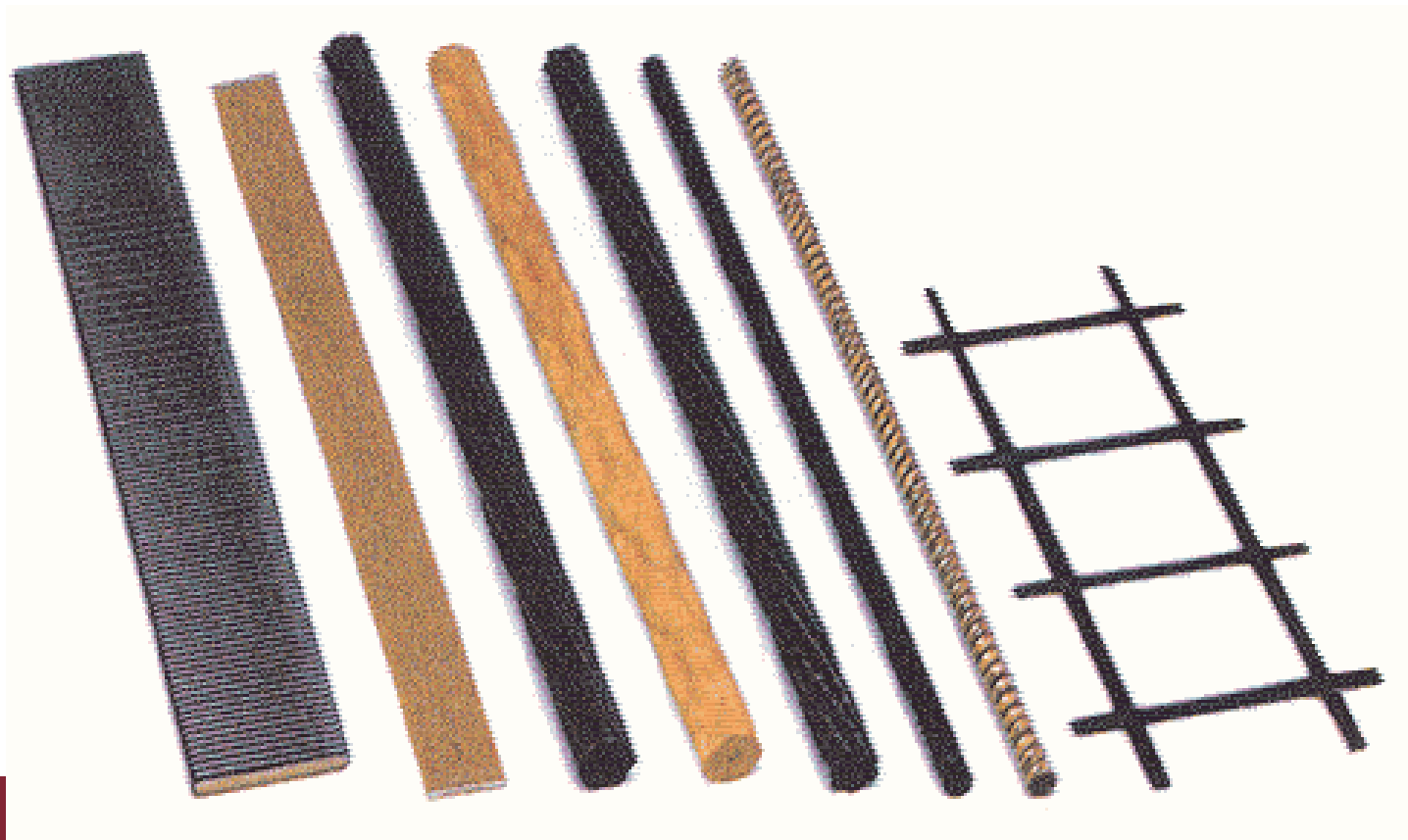


**Preformati**  
*pre-cured systems*

- ottenibili mediante pultrusione
- forma e sezione variabile
- applicazione mediante adesivi.



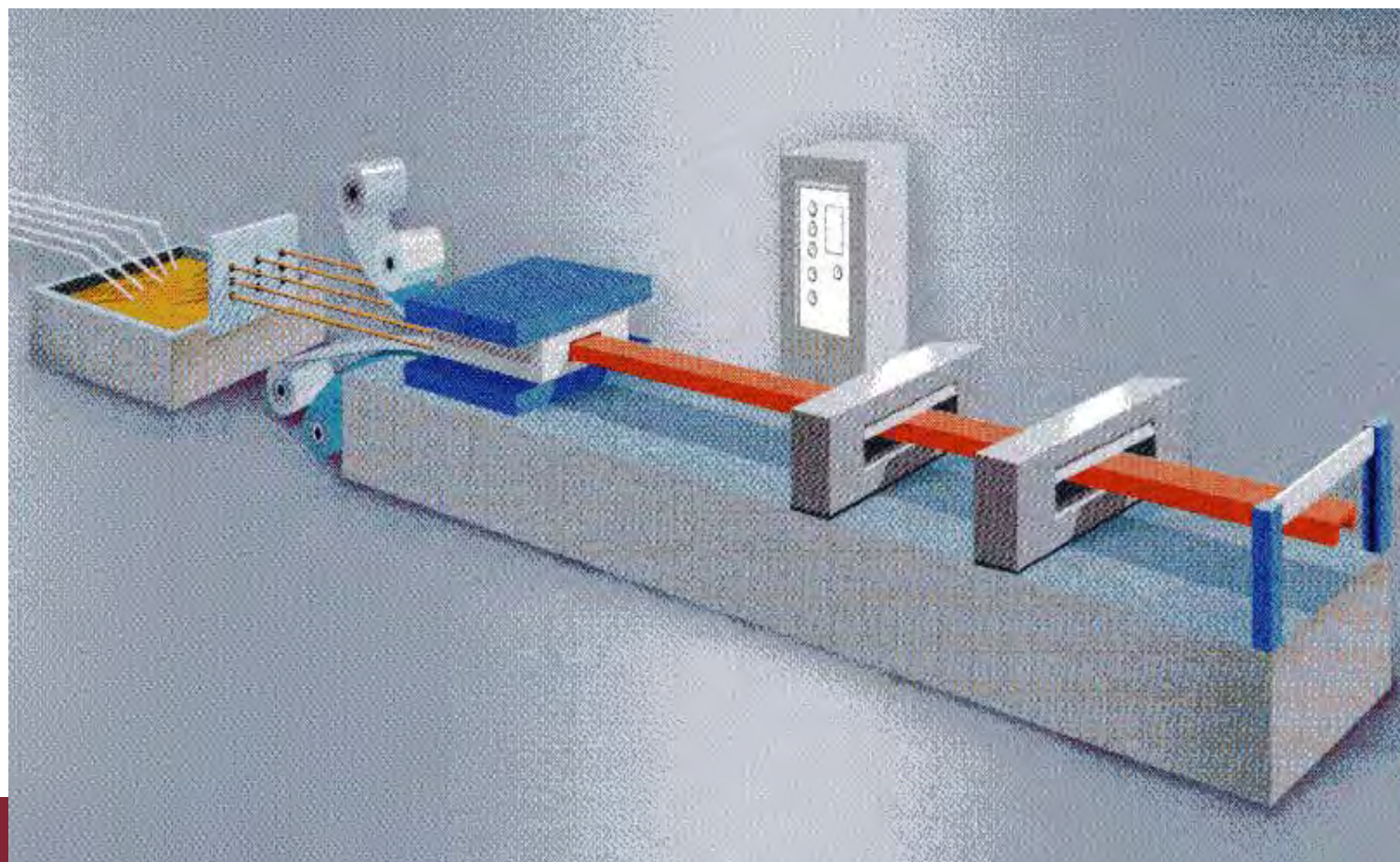
## Le barre in FRP





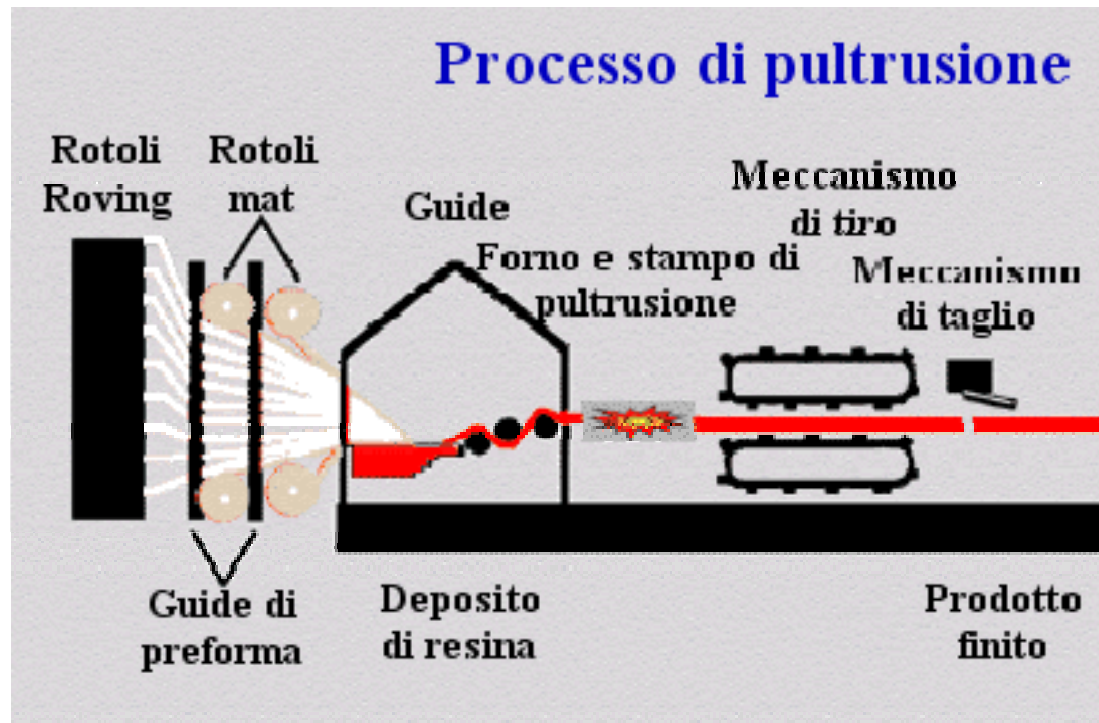
# Tecniche di produzione

## La pultrusione



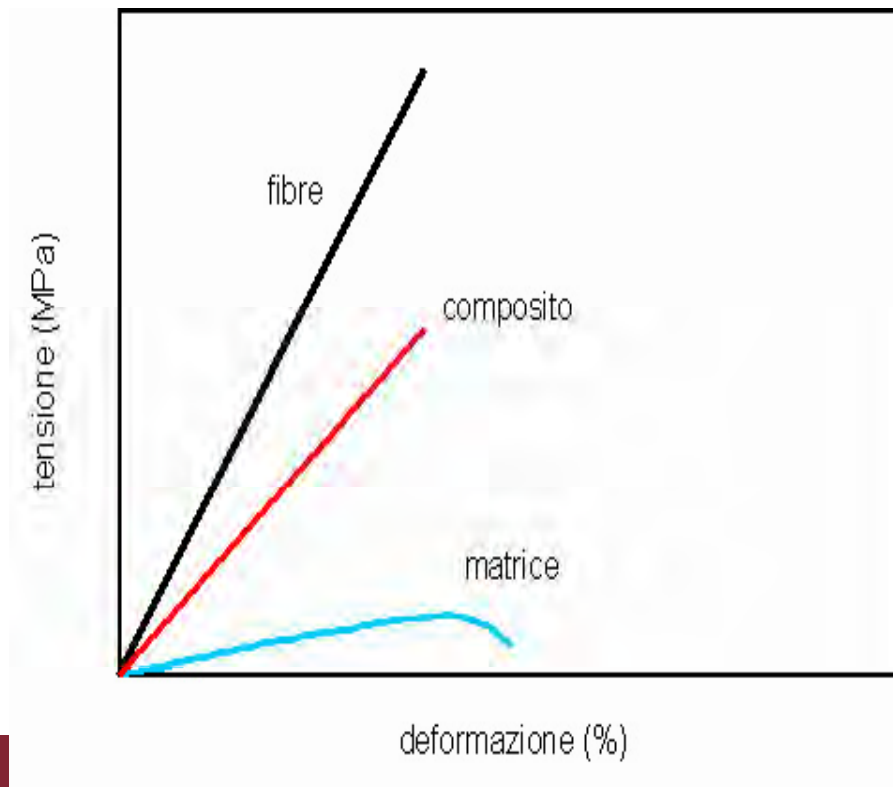
# Tecniche di produzione

## La pultrusione

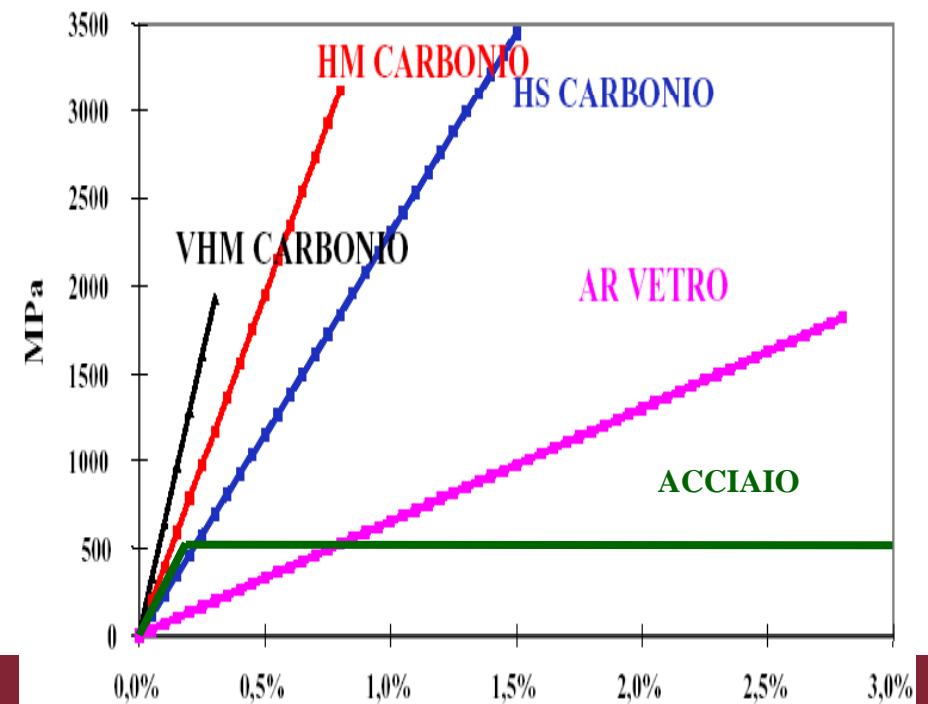


# Proprietà meccaniche degli FRP

## Caratteristiche dei componenti



## Caratteristiche degli FRP

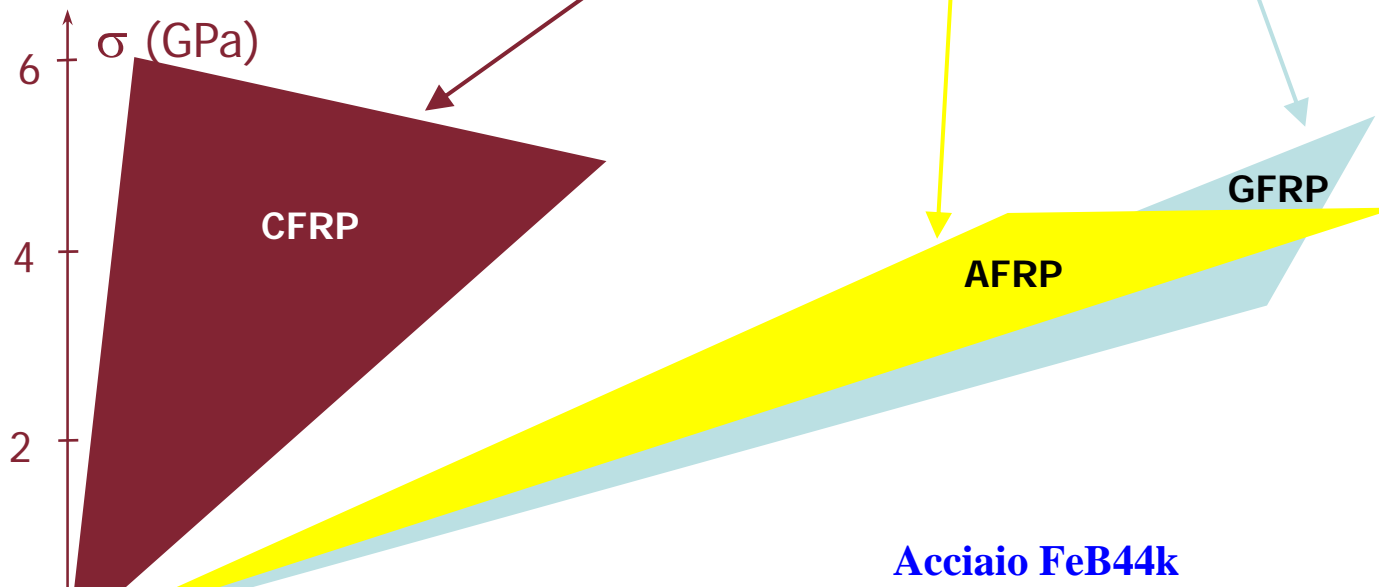
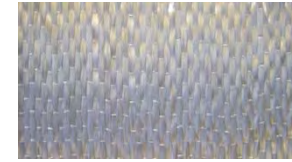




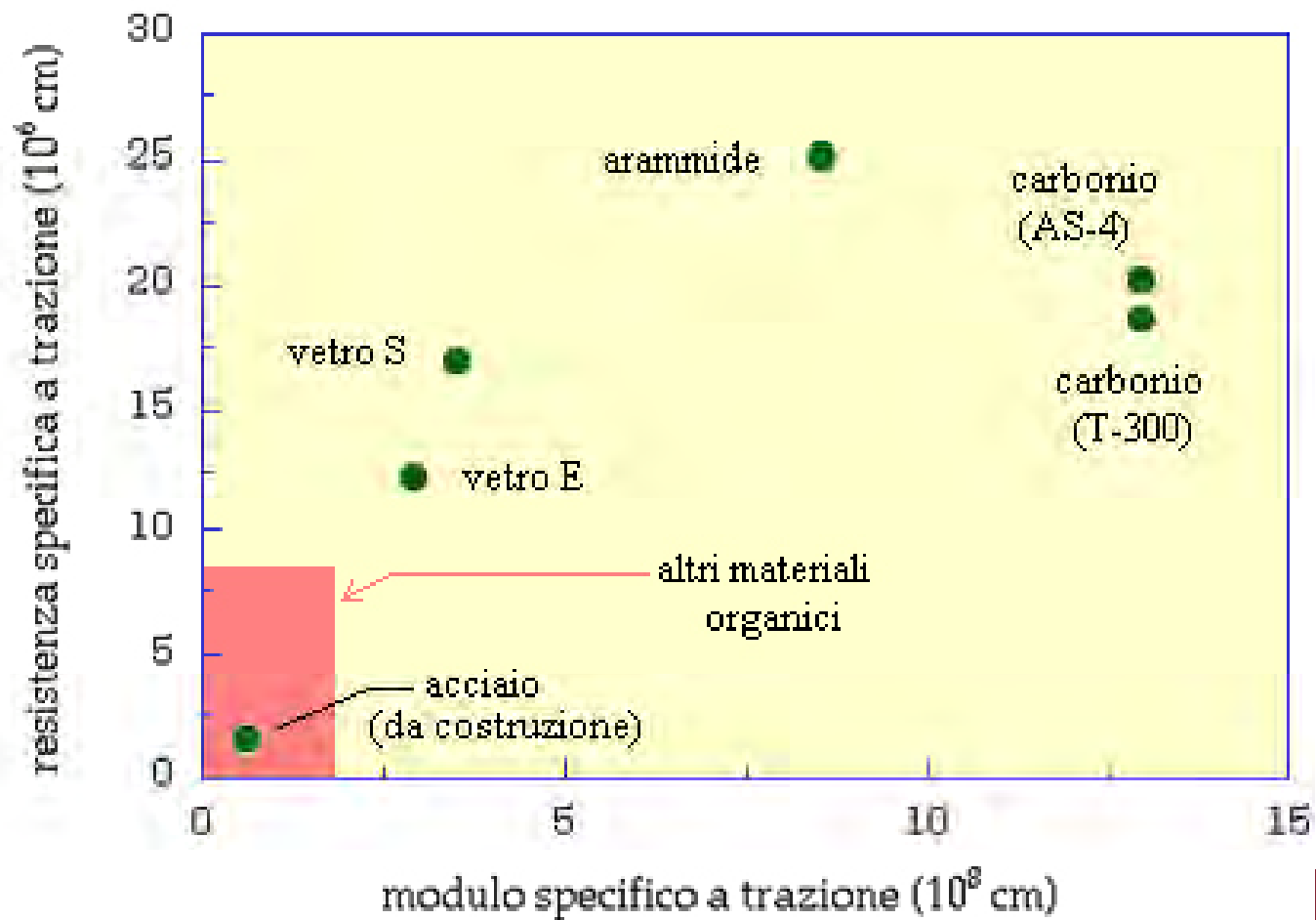
# Modulo e resistenza

## ■ Tipi di FRP

- A base di: Carbonio, Aramide, Vetro



## Proprietà degli FRP



# Modulo e resistenza

## Preformati FRP vs. fibre

Sistemi preformati CFRP	Modulo di elasticità [GPa]		Resistenza a rottura [MPa]		Deformazione a rottura [%]	
	FRP $E_f$	Fibre $E_{fib}$	FRP $f_f$	Fibre $f_{fib}$	FRP $\epsilon_{fu}$	Fibre $\epsilon_{fib,u}$
Basso modulo	160	210-230	2800	3500-4800	1.6	1.4-2.0
Alto modulo	300	350-500	1500	2500-3100	0.5	0.4-0.9

Valori FRP inferiori a fibre

Valori comparabili

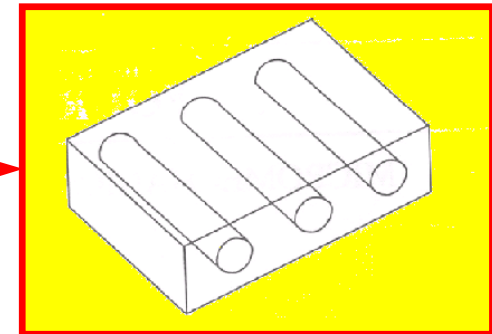


# Modulo e resistenza Regola delle miscele (preformati)

*Modulo:*  $E_f = V_{fib} \cdot E_{fib} + (1 - V_{fib}) \cdot E_m$

*Resistenza:*  $f_f \cong V_{fib} \cdot f_{fib} + (1 - V_{fib}) \cdot f_m$

$V_{fib}$  è la frazione volumetrica  
= Volume fibre / Volume composito



Stima sufficientemente accurata per

- FRP unidirezionali
- Modulo elastico

# Modulo e resistenza

## Frazione di volume

Per stimare modulo e resistenza  
si applica la regola delle miscele con:

$$V_{\text{fib}} = 50-70 \%$$

Si ignorano:

- ❖ aderenza fibra-matrice
- ❖ presenza difetti interni (vuoti, ecc.)
- ❖ distribuzione fibre non omogenea
- ❖ imperfezioni orientamento fibre

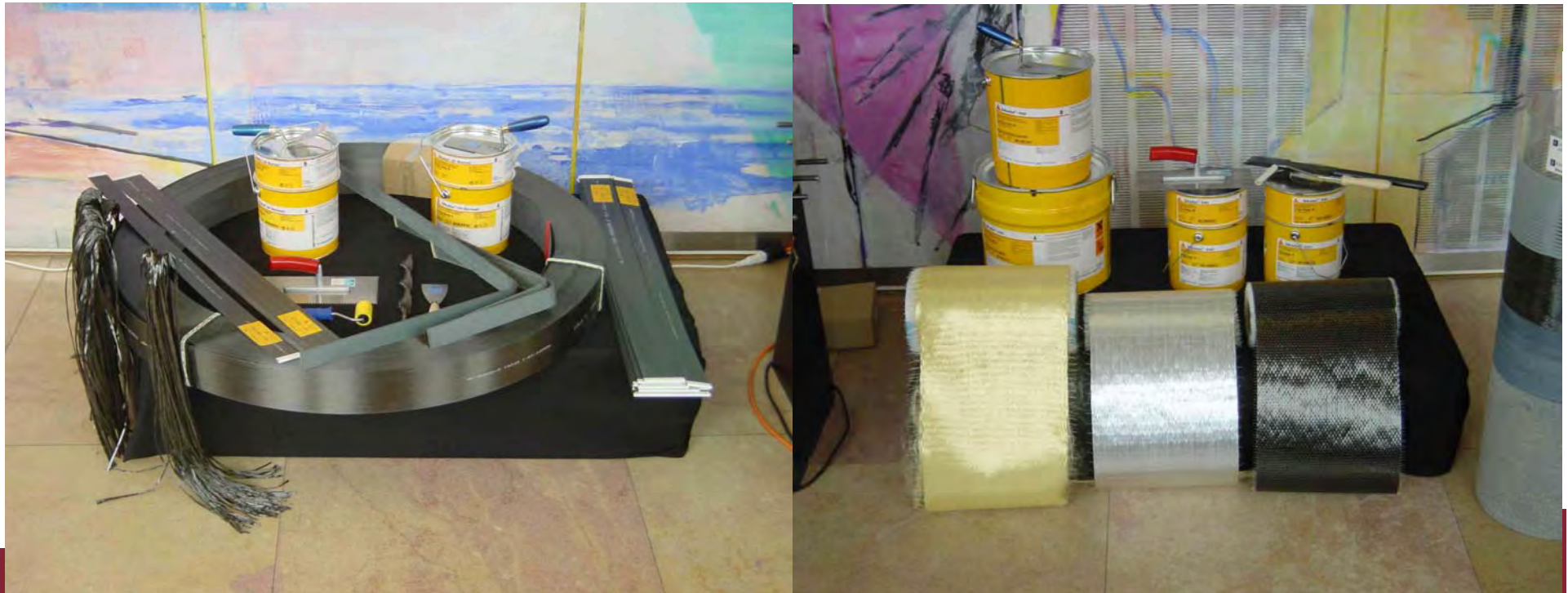
Prove sperimentali eseguite dal produttore

# Sistemi di rinforzo

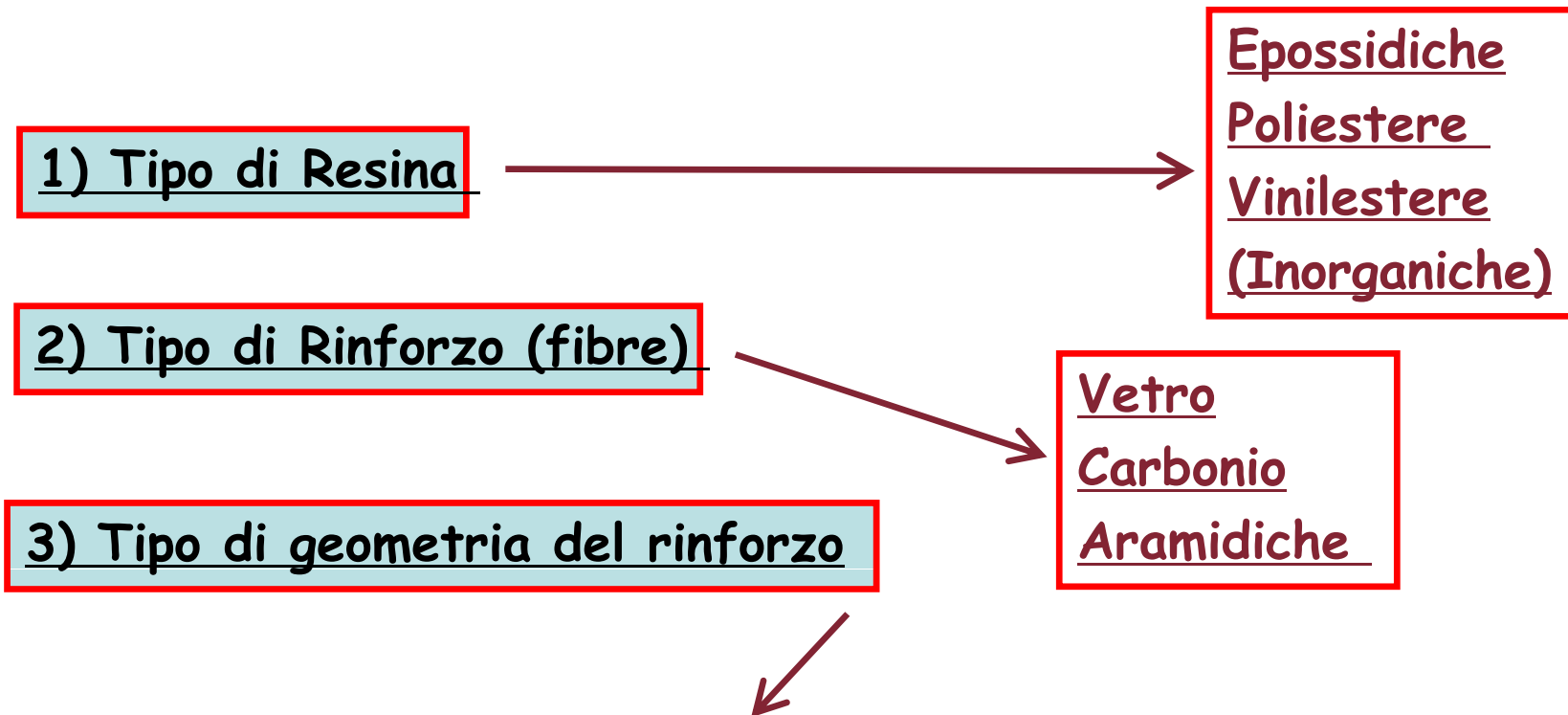


## Materiali base per il rinforzo

- Lamine in CFRP
- Lamine a L in CFRP
- Tessuti monodirezionali
- Tessuti multidirezionali



# Classificazione dei rinforzi in FRP



tipologia di prodotto	$V_{fib}$ [%] (valore minimo)	$V_{long} / V_{fib}$ [%] (valore minimo)	Esempio
A	50	95	lamine, barre, cavi
B	30	95	tessuti UD (impregnati in cantiere)
C	30	40	tessuti 2-D (impregnati in cantiere)



# IL CNR DT-200/2004

## Progettazione di rinforzi con FRP

Esempi di applicazioni

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA  
STRUTTURALE E GEOTECNICA



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

Giorgio Monti  
*Ordinario di Tecnica delle Costruzioni*



# Materiali e tecniche di rinforzo

- Tecniche di base



Rinforzo  
a flessione  
di travi

Rinforzo  
a taglio  
di travi



Rinforzo  
di un impalcato da ponte  
con lamine

## Materiali e tecniche di rinforzo

- Tecniche di base



Confinamento di pilastri

# Metodi di posa in opera

## WET LAY-UP

Impregnazione  
manuale della  
resina



Disposizione  
del composito



Eliminazione  
dell'eccesso  
di resina





# Metodi posa in opera Wet Lay-Up





## Metodi posa in opera Wet Lay-Up di tessuti



# Metodi posa in opera Lamine

Lamina  
pultrusa



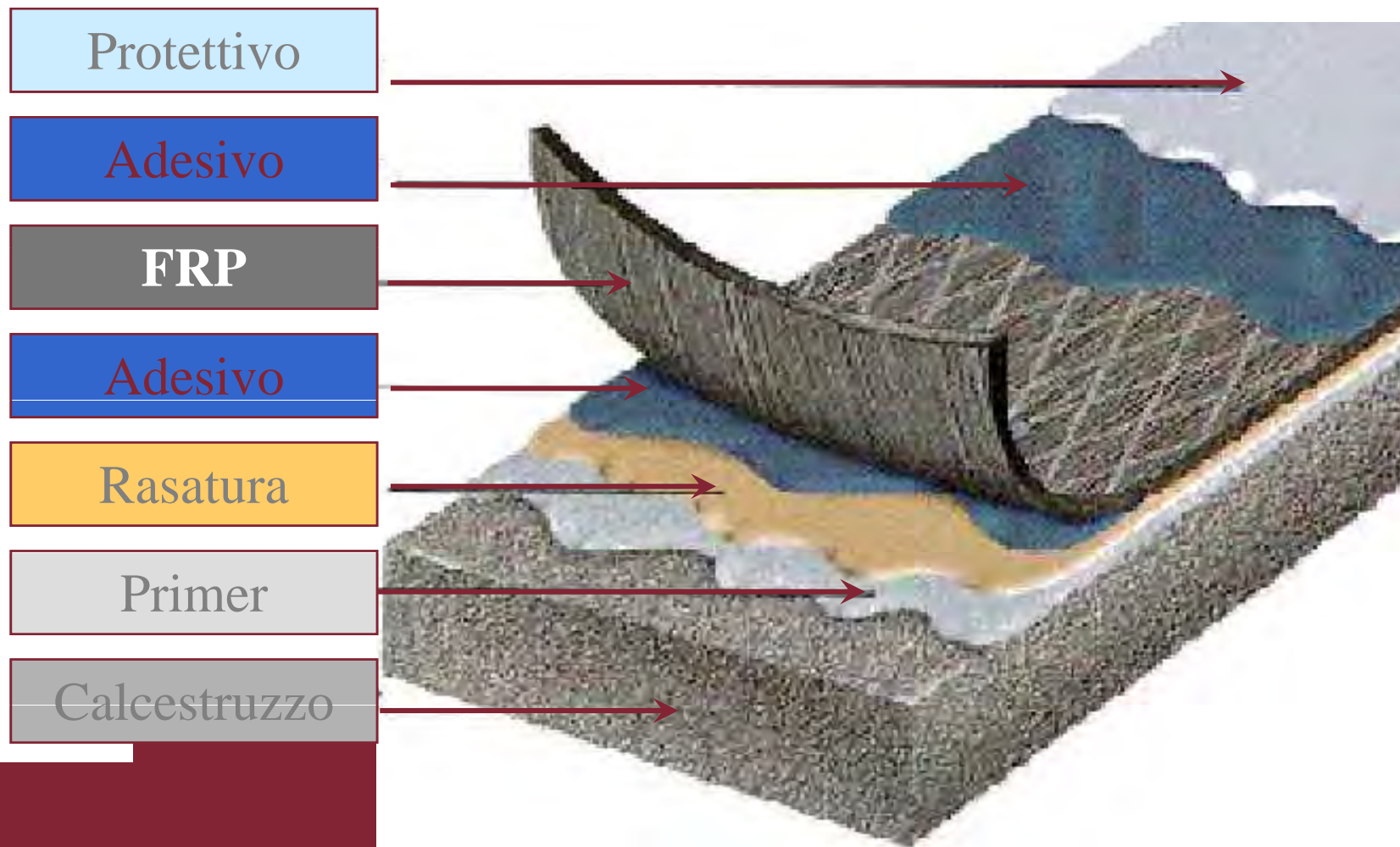
Taglio in opera  
di lamine  
prefabbricate



Lamine  
prefabbricate  
poste in opera



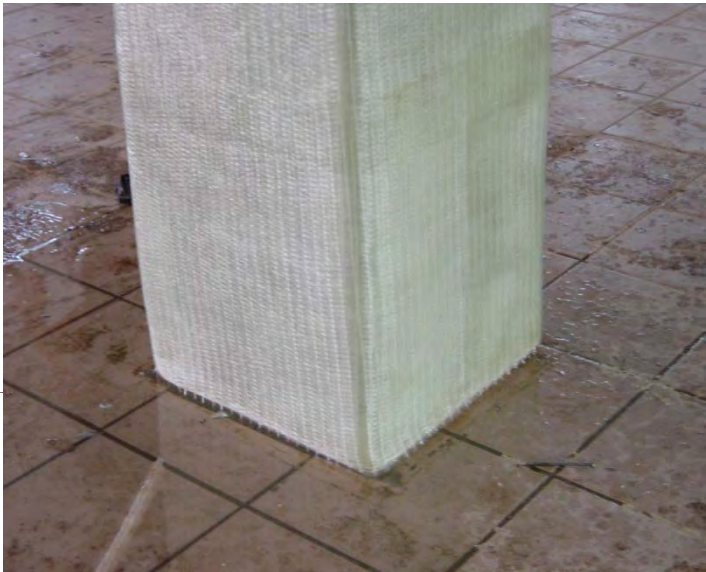
## Messa in opera di un rinforzo in FRP











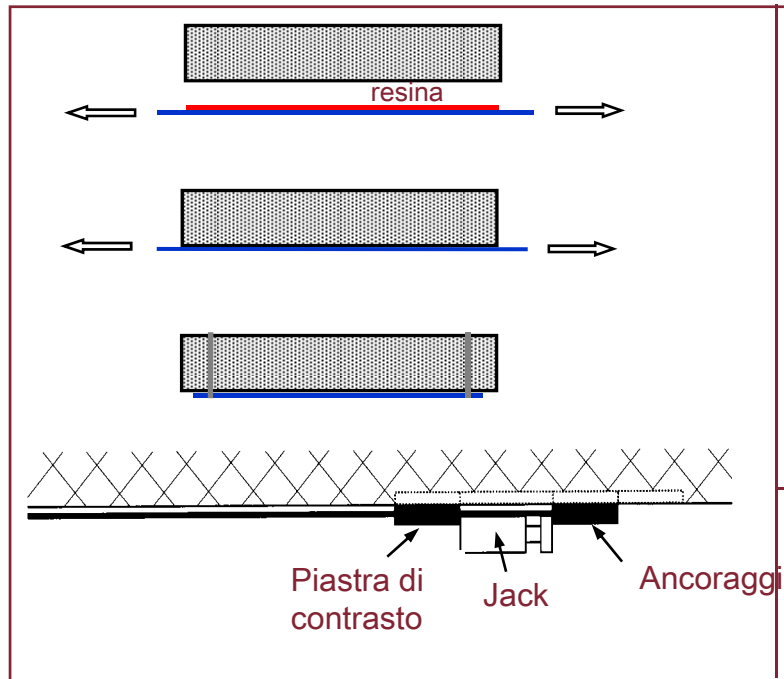
## Materiali e tecniche di rinforzo

- Tecniche speciali

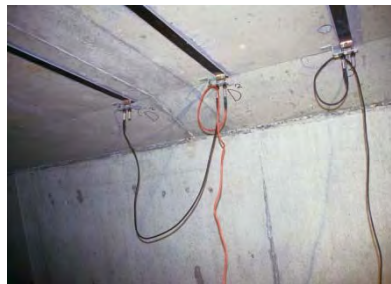
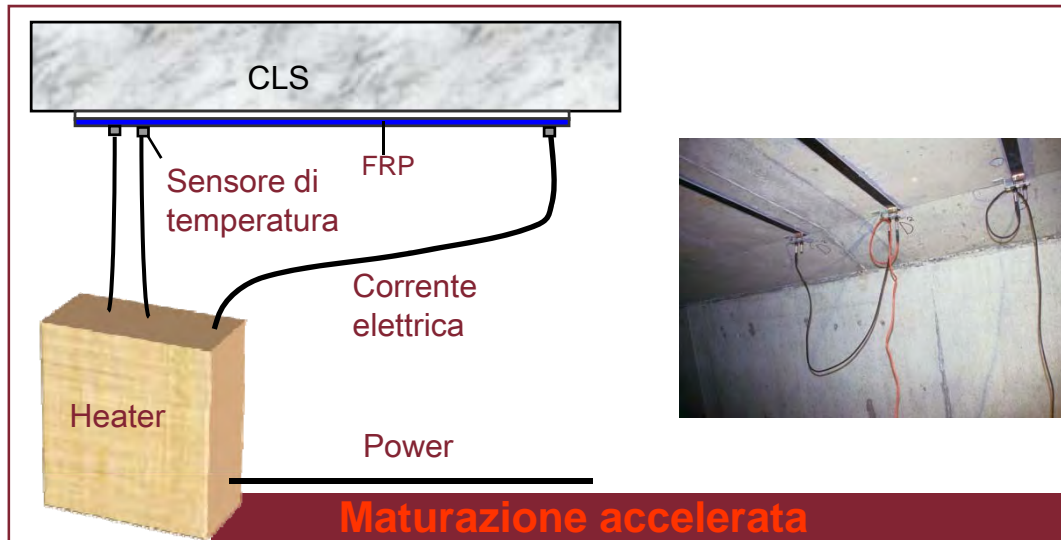


Elementi speciali prefabbricati

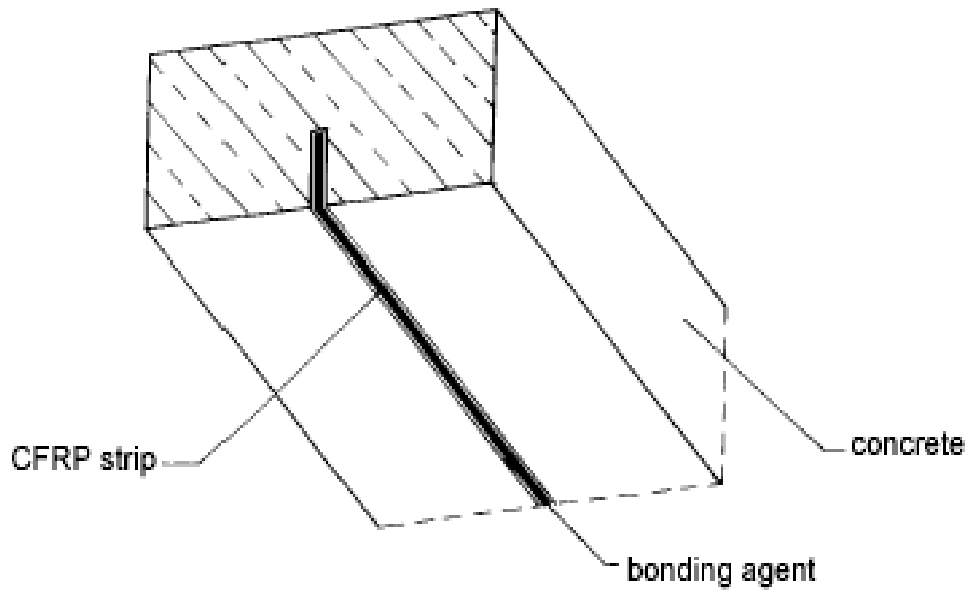




## TECNICHE SPECIALI



**Rinforzi NSM**





## Materiali e tecniche di rinforzo

- Tecniche speciali



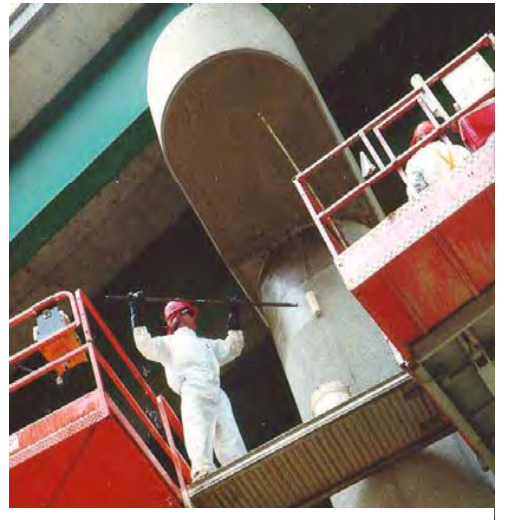
**Strisce a L per il rinforzo a taglio**













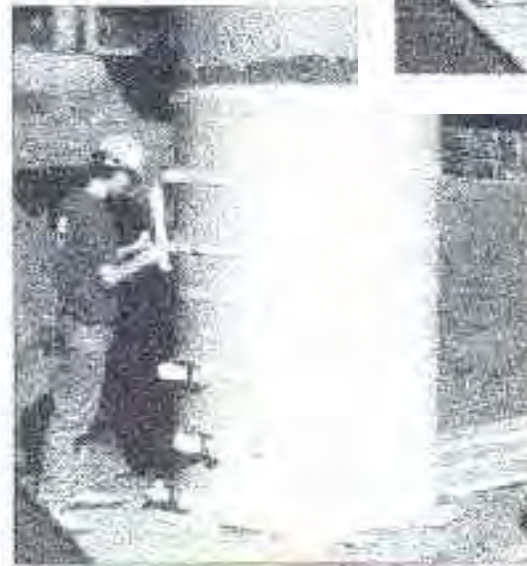
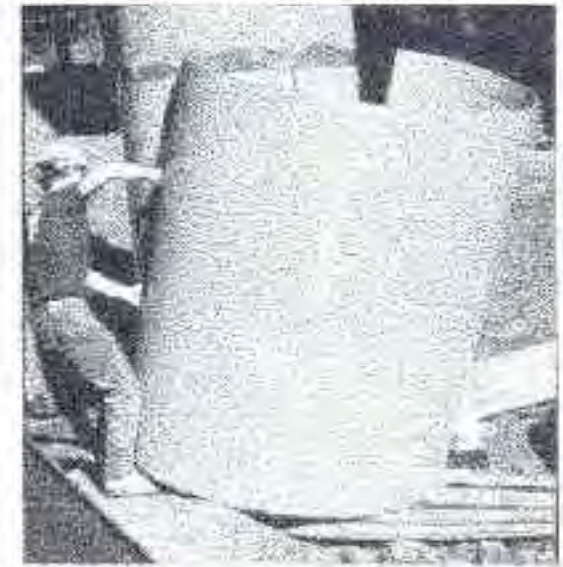


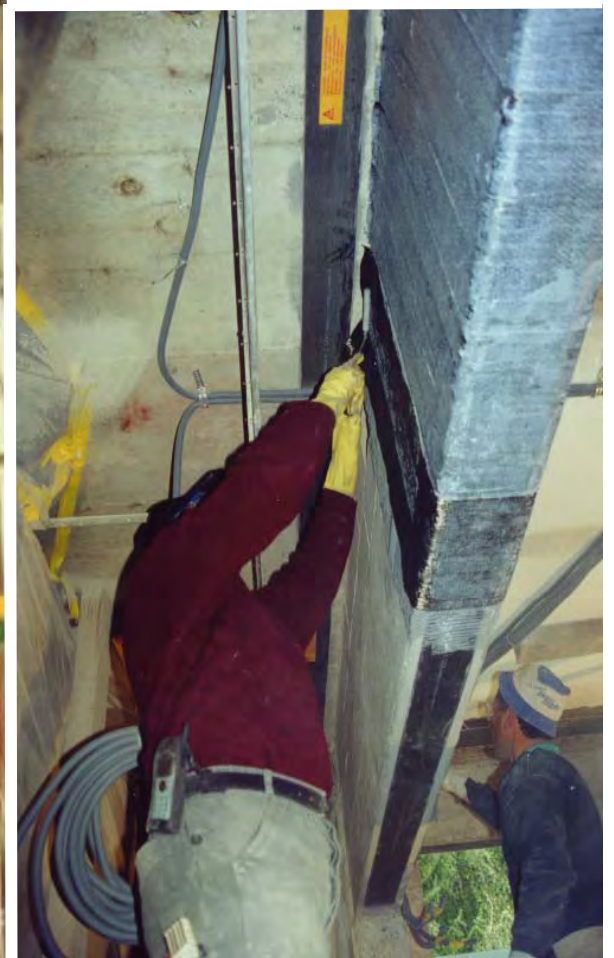




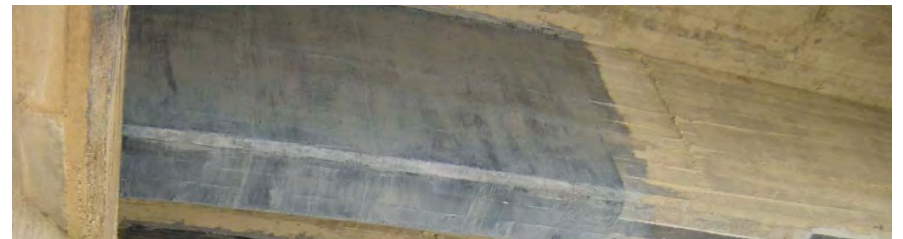
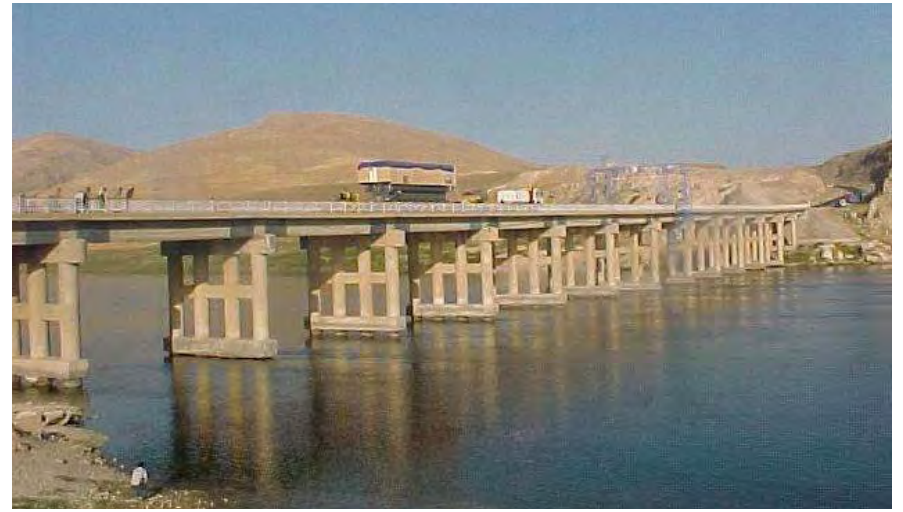
Rinforzo di elementi con FRP preteso













# Rinforzo per impatto





# Adeguamento sismico del X.A.N.Θ. Building – Salonicco, Grecia



# Situazione pre-intervento













# APPLICAZIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI



Rinforzo di opere civili



# APPLICAZIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI



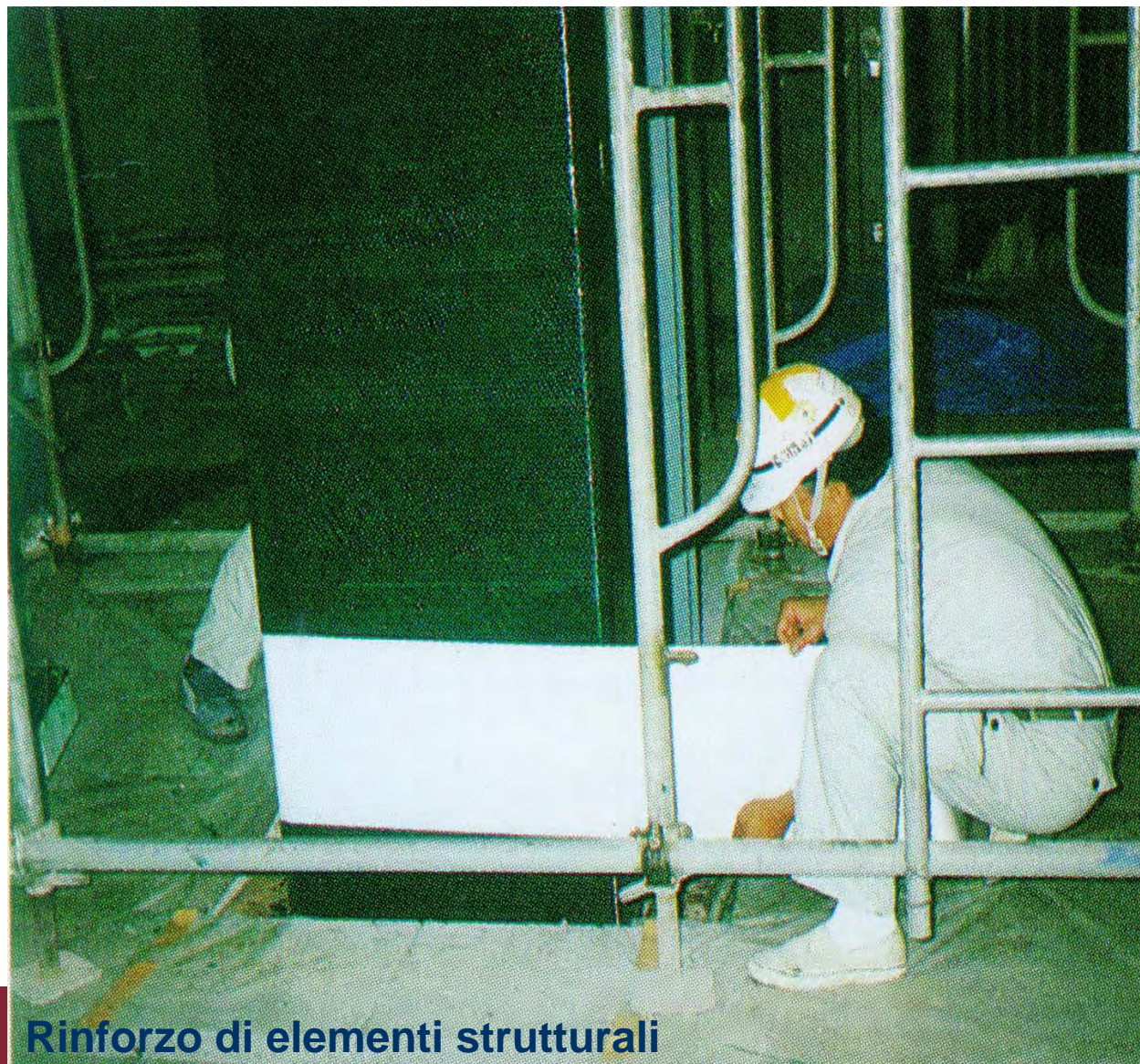


# APPLICAZIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI





# APPLICAZIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI



Rinforzo di elementi strutturali



# APPLICAZIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI



Rinforzo di elementi strutturali



# APPLICAZIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI



Rinforzo di elementi con FRP preteso



# APPLICAZIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI

**Rinforzo combinato  
(globale e locale)**

**Barre di acciaio per collegare le  
pareti di taglio in c.a.**

**L'FRP è impiegato per far fronte  
all'incremento di domanda di taglio  
nel pilastro a seguito  
dell'inserimento delle pareti in c.a.**



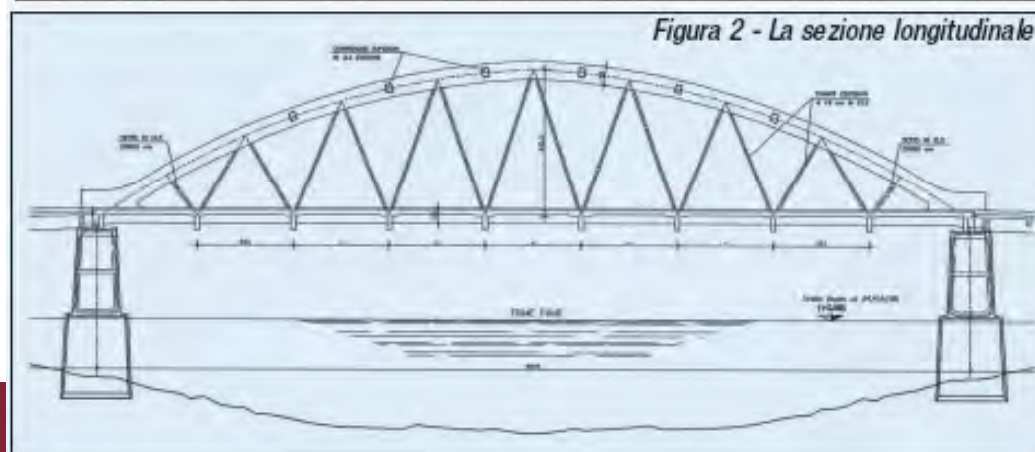
## Un ponte sul Piave

Costruito nel 1950

Lunghezza 105 m

Larghezza 8.70 m

Luce centrale 55 m





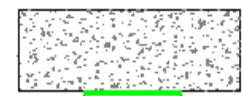
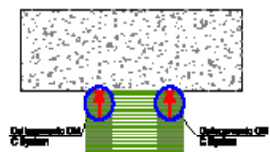
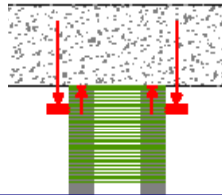


## OSPEDALE DI MILANO - 2006

**CARBOSTRU C-System® M+ N+**





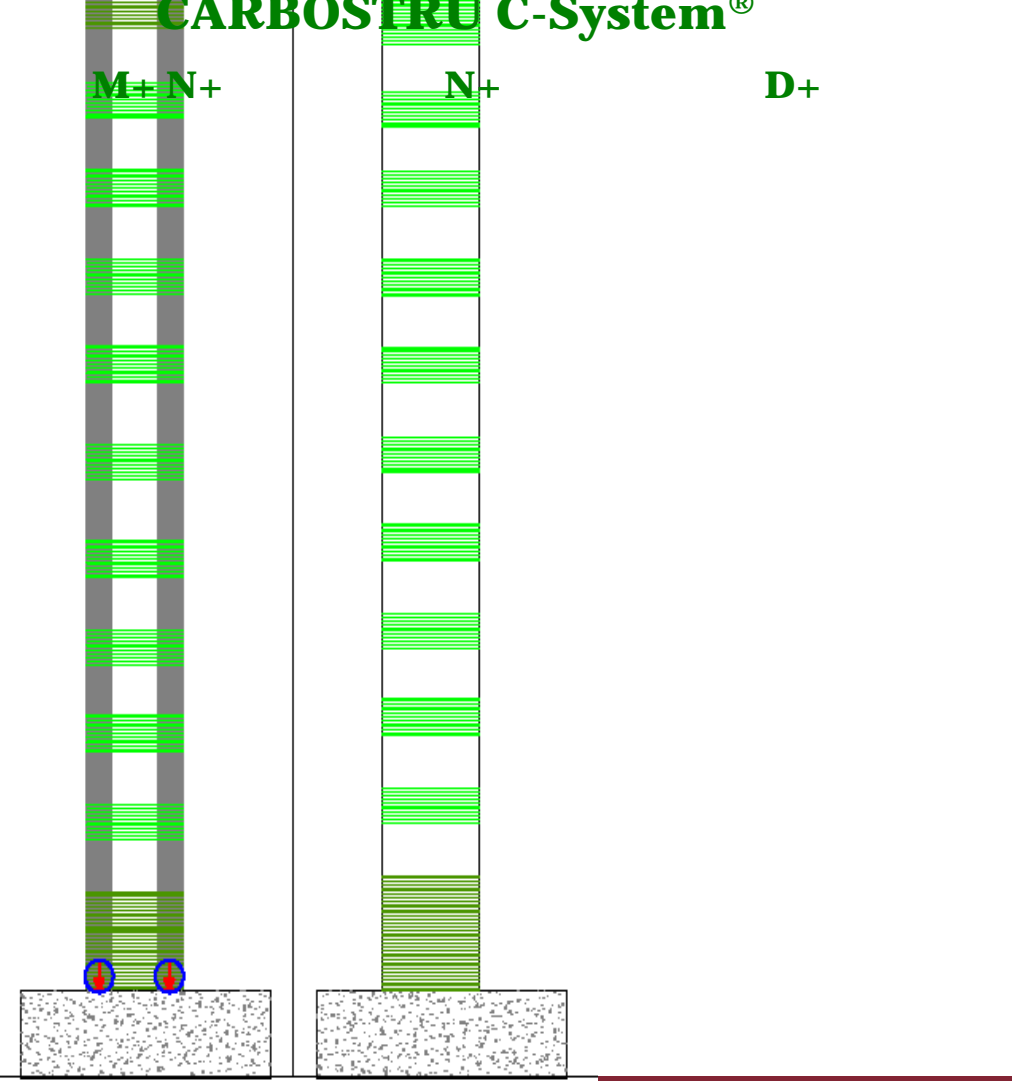


# CARBOSTRU C-System®

M+ N+

N+

D+

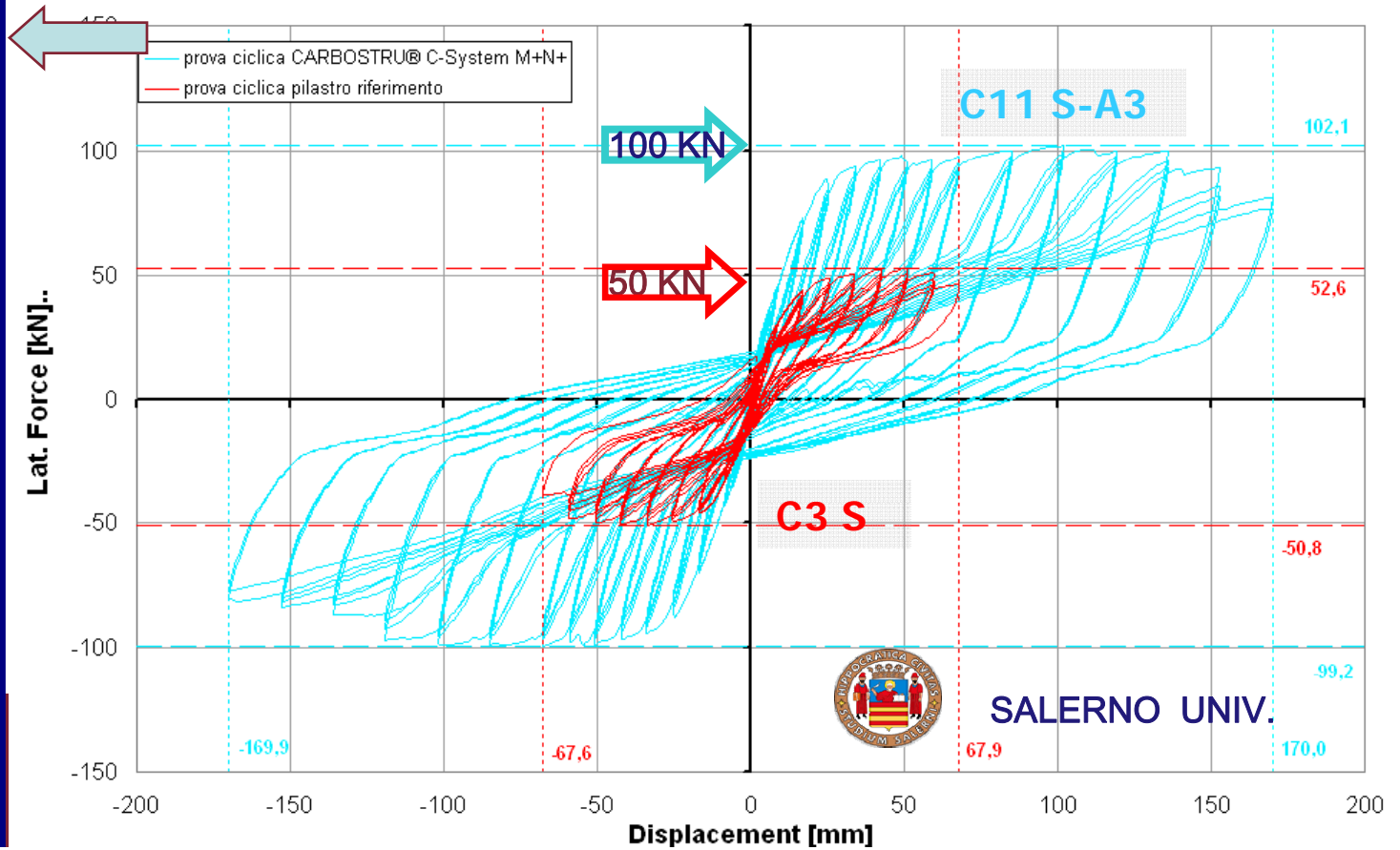


380 KN



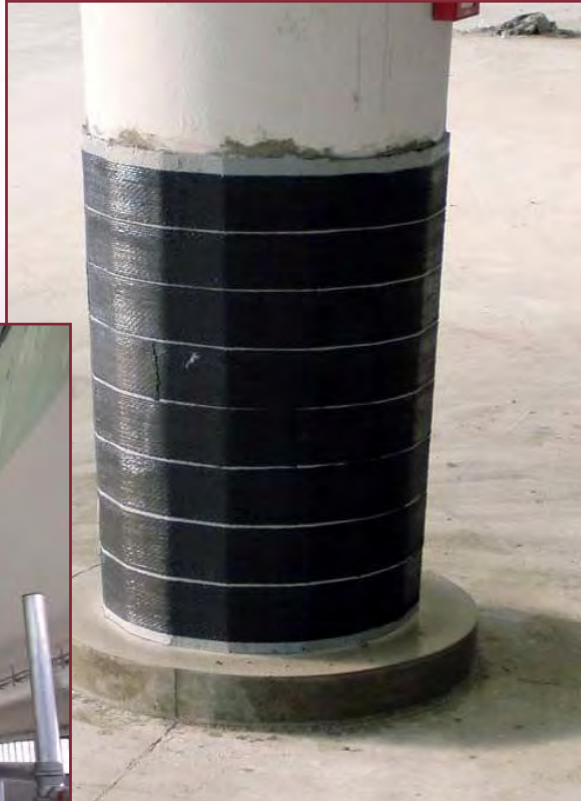
100 KN

### CARBOSTRU C-System® M+ N+



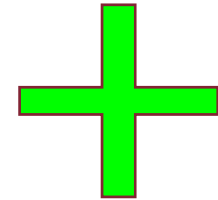


# FIERA DI LATINA - 2003



- Peso ridotto
- Immunità alla corrosione
- Nessuna limitazione di lunghezza
- Facilità e velocità nell'applicazione
- Resistenza elevata
- Nessun cambiamento di dimensioni
- Aumento di resistenza e deformabilità

senza aumento di rigidità



- 
- Costi elevati (non necessariamente i totali!)
  - Scarsa duttilità (ma elevata deformabilità!)
  - Sensibilità alle alte temperature e ai raggi UV

• Ma







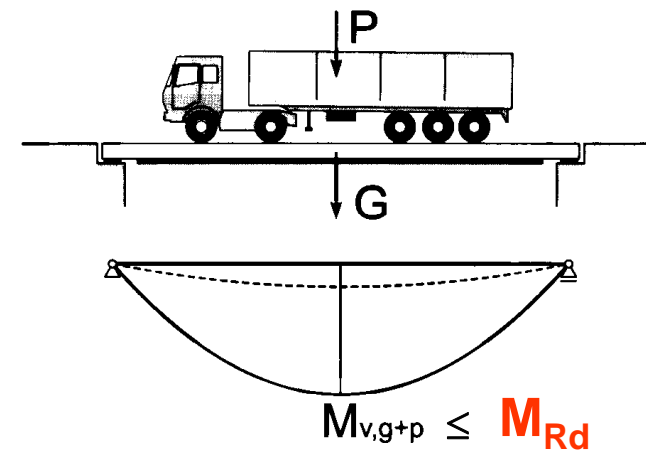
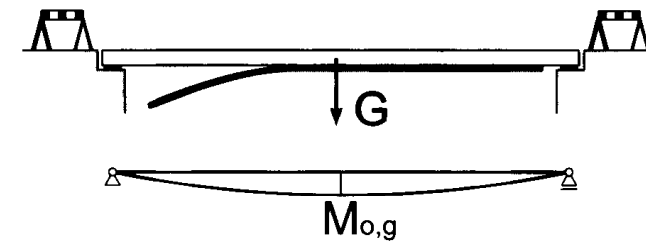
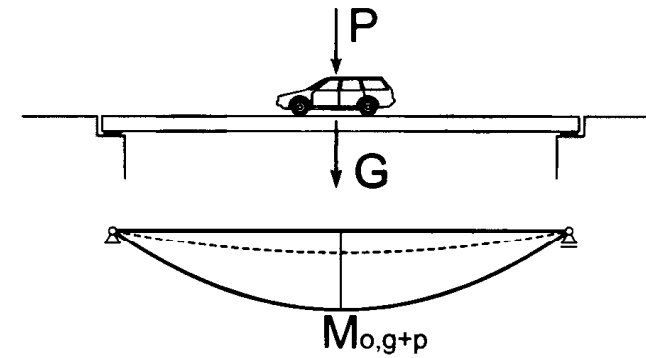
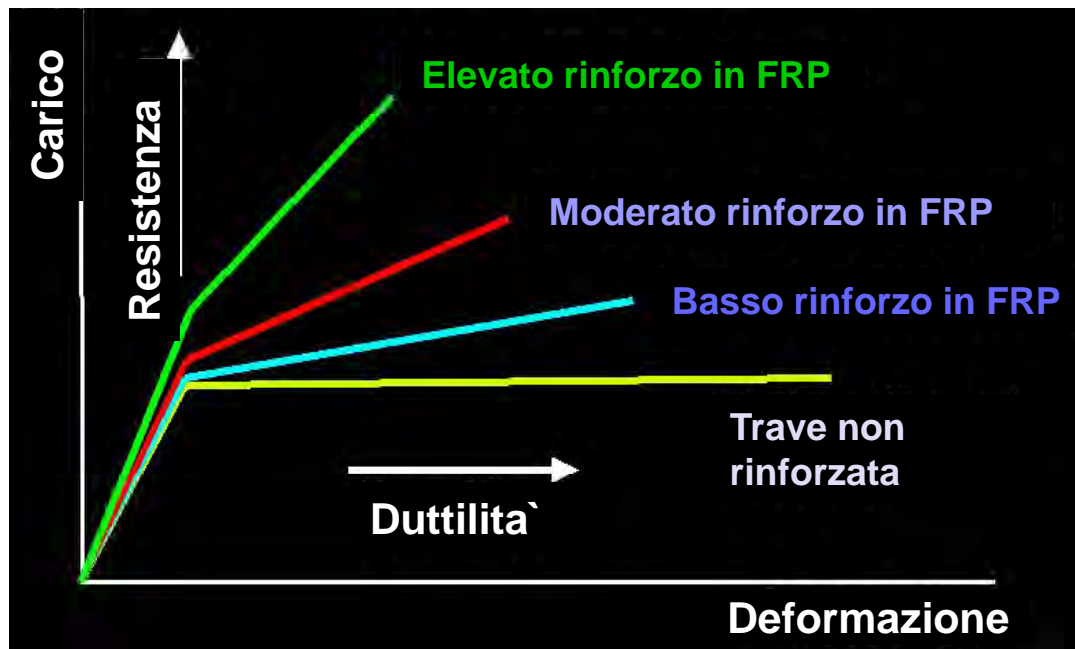




## Tipologie di rinforzo

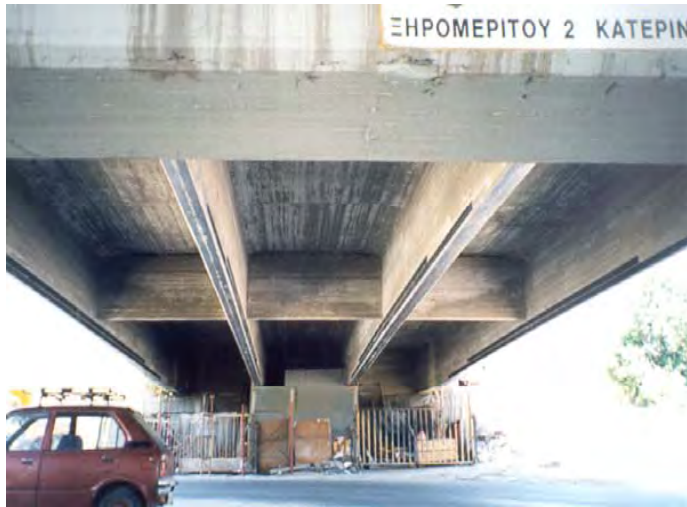
- Rinforzo a flessione
- Rinforzo a taglio
- Rinforzo per confinamento

# Strategie di rinforzo

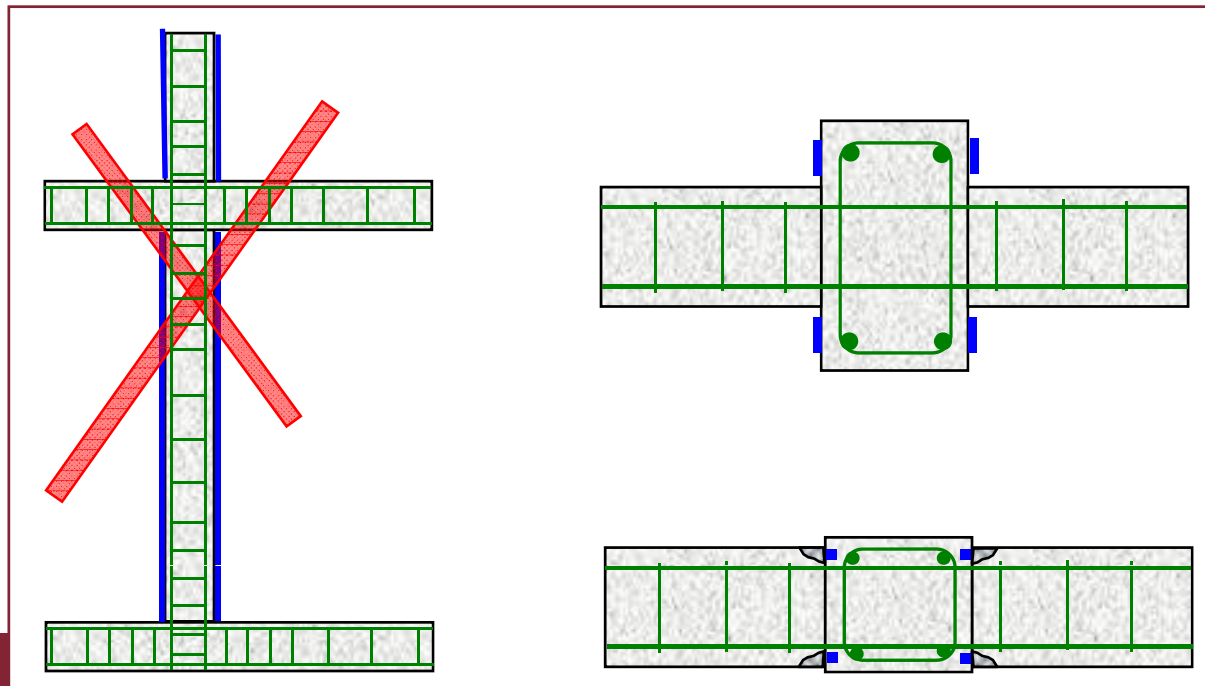




# RINFORZO A FLESSIONE

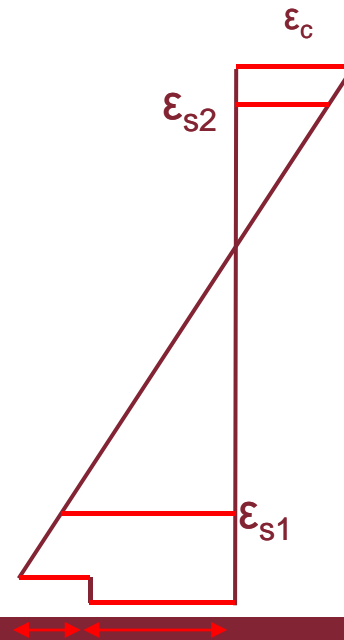
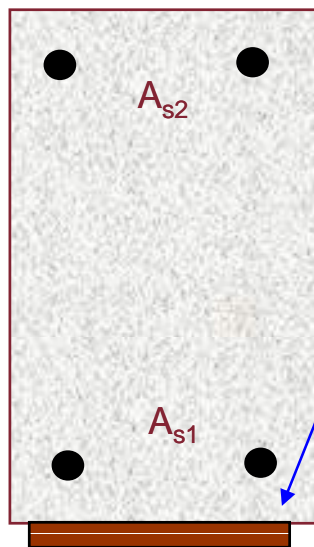
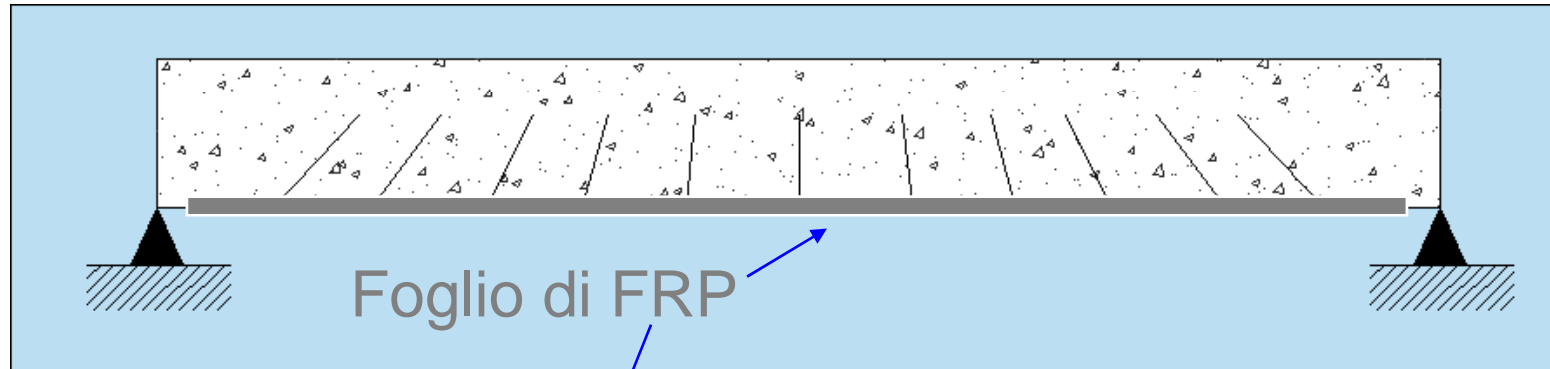


Travi - solette



Pilastrì

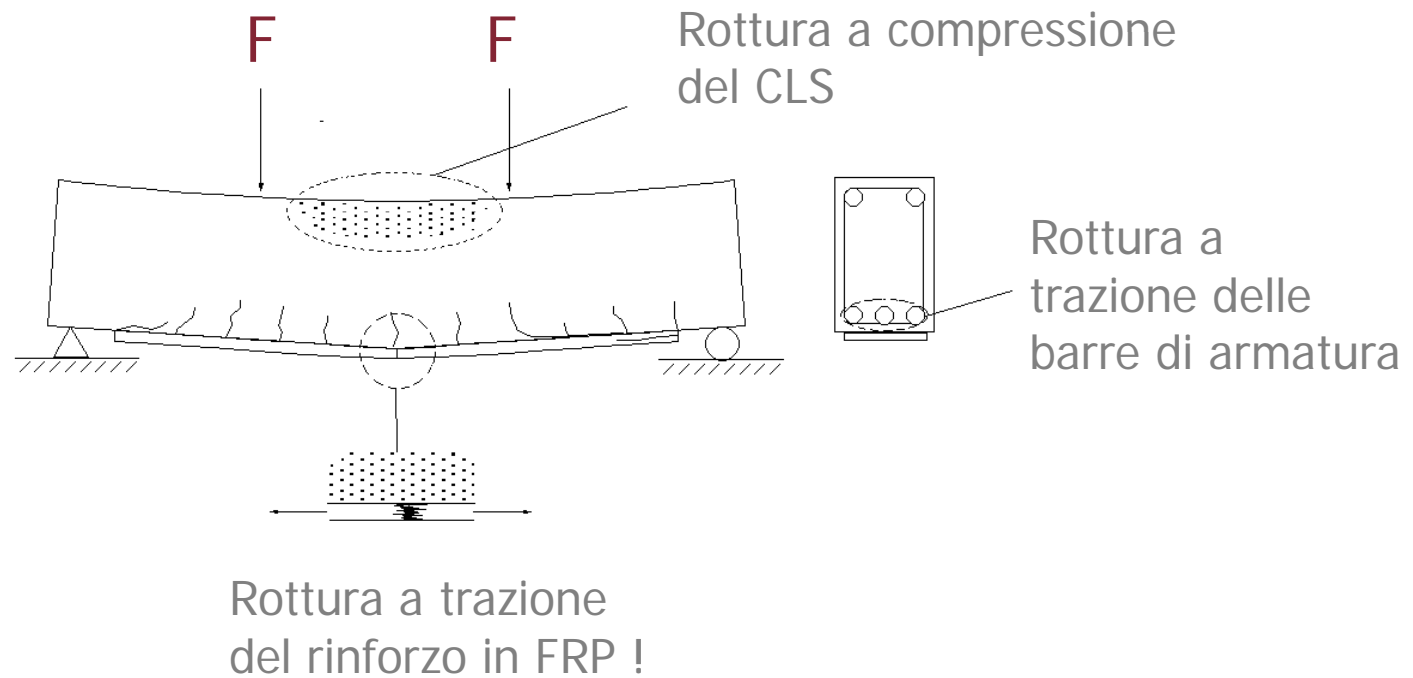
# Rinforzi a flessione



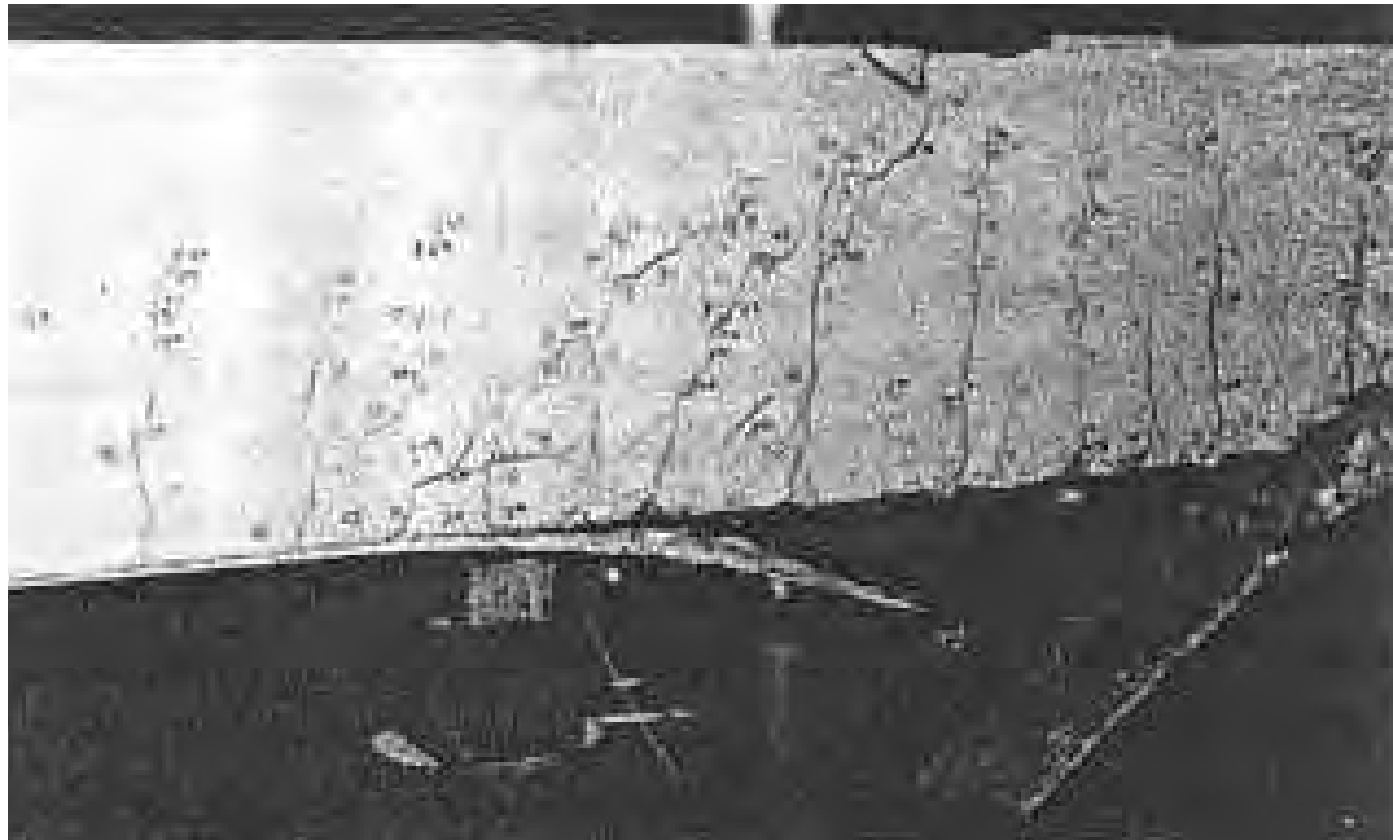


# L'ancoraggio nella flessione

## Meccanismi di collasso



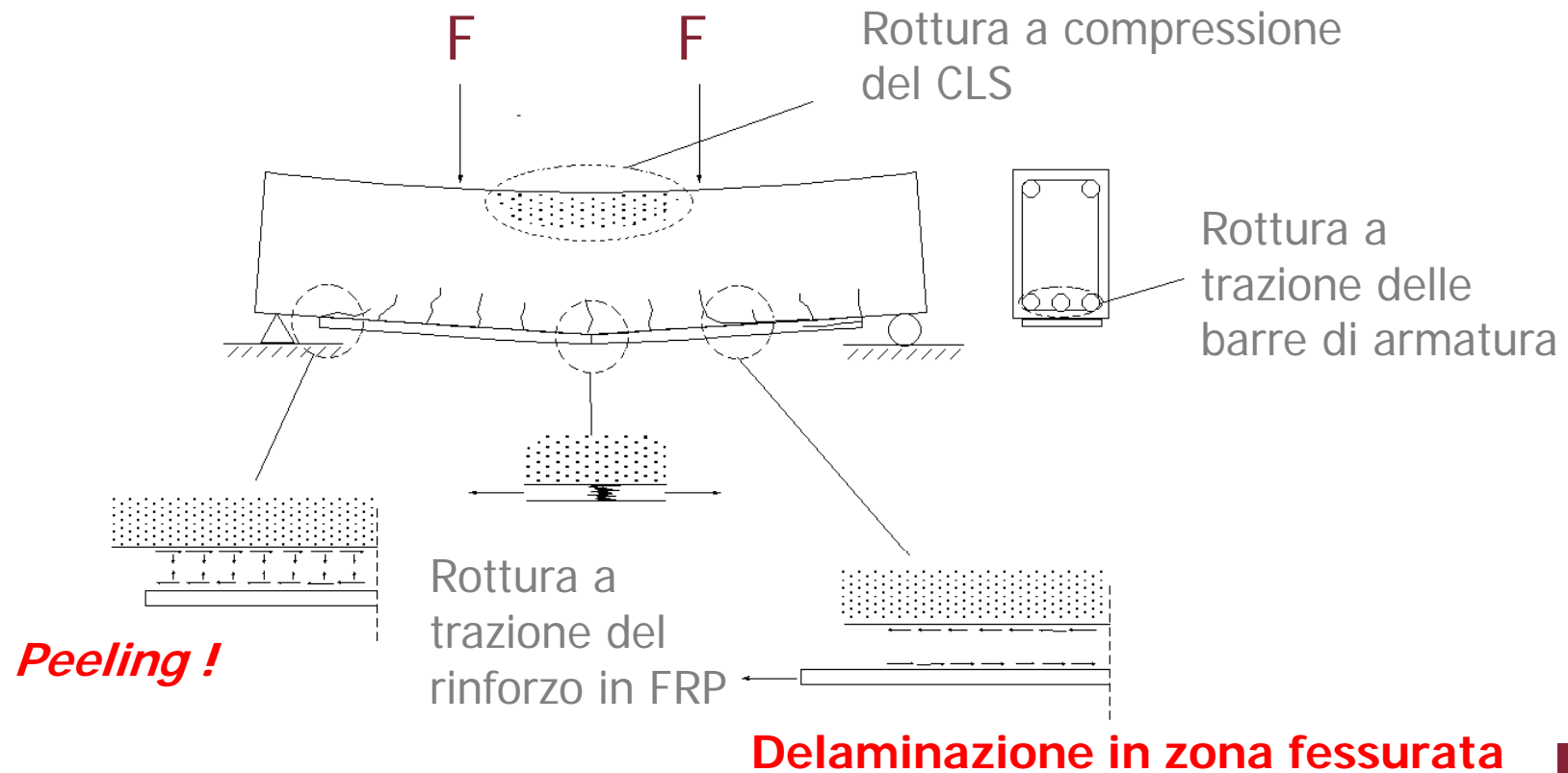
# Rottura a trazione dell'FRP



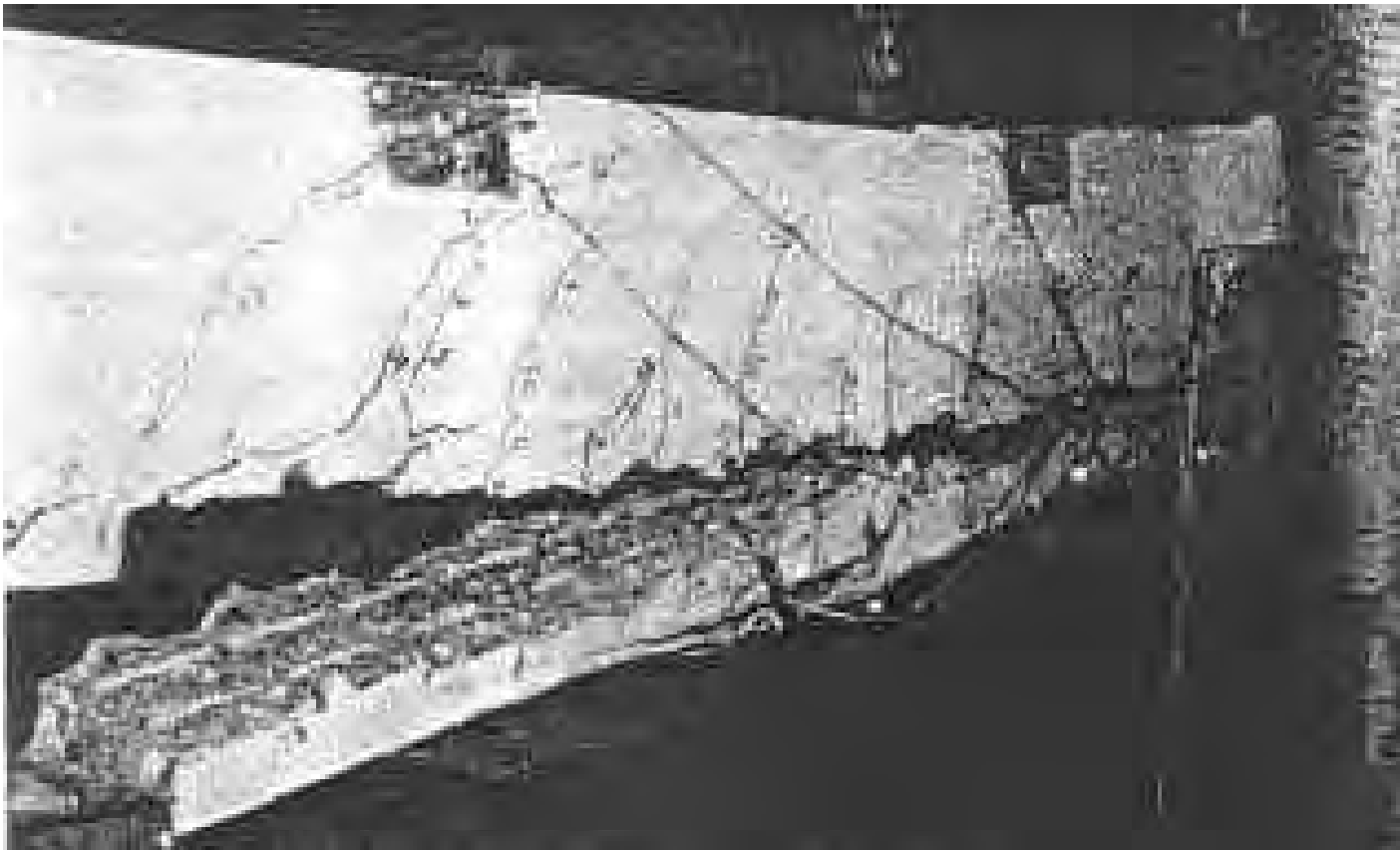


# L'ancoraggio nella flessione

## Meccanismi di collasso

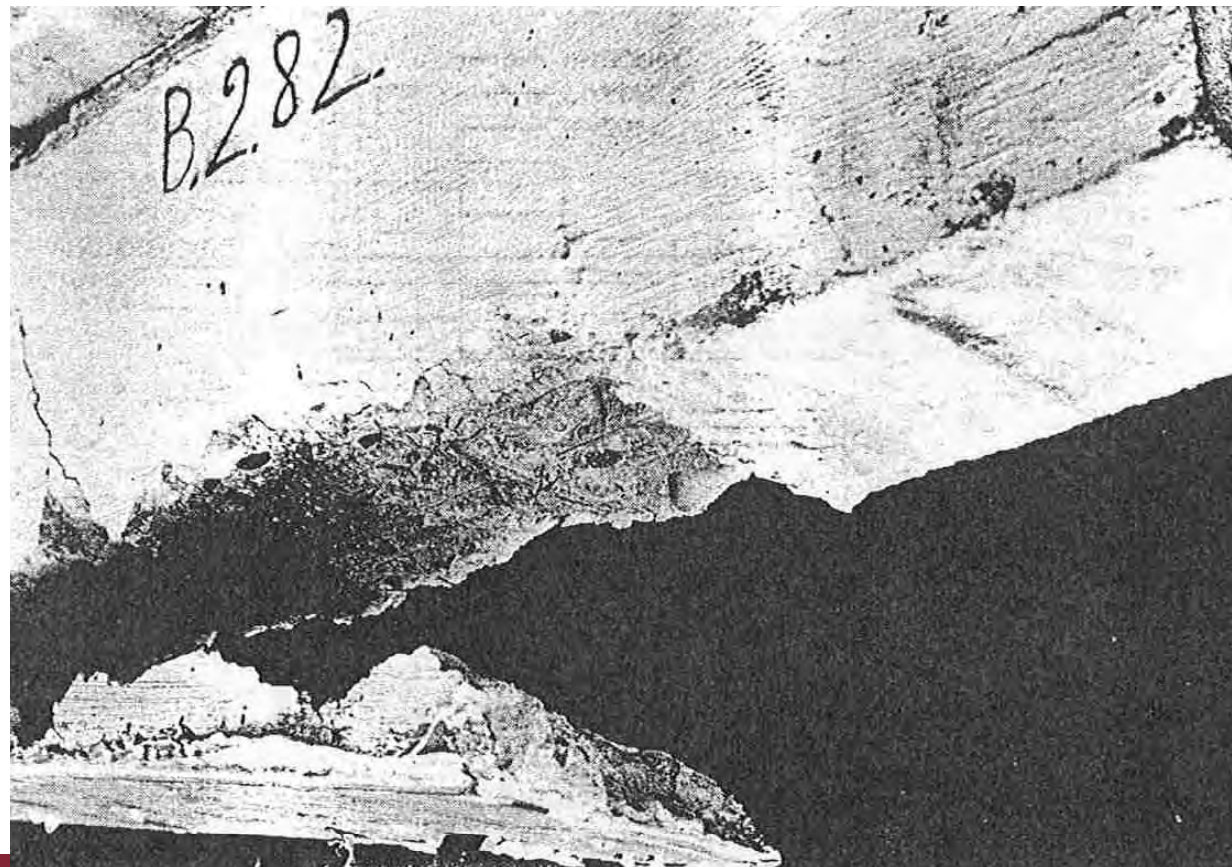


# II peeling



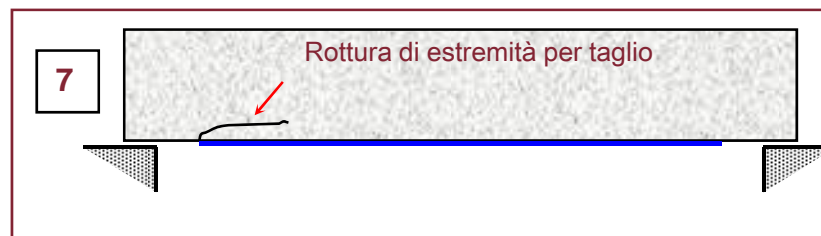
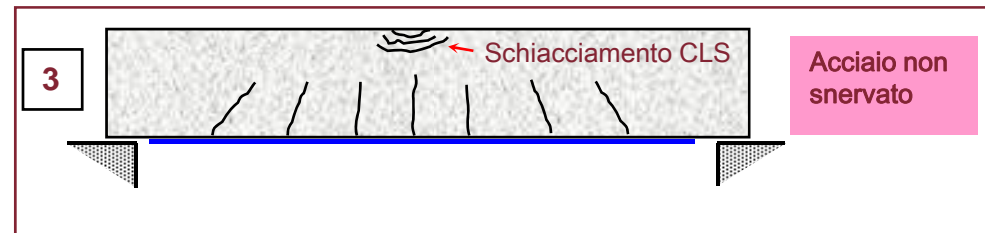
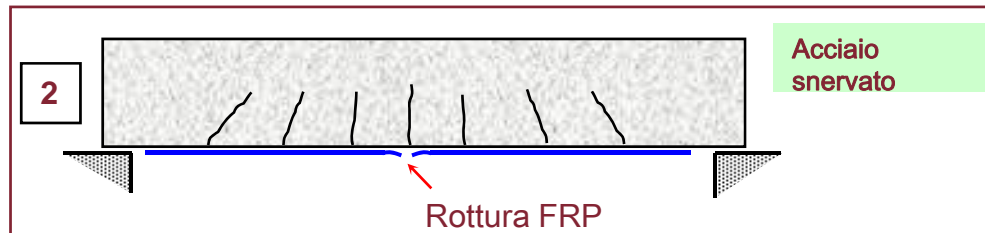
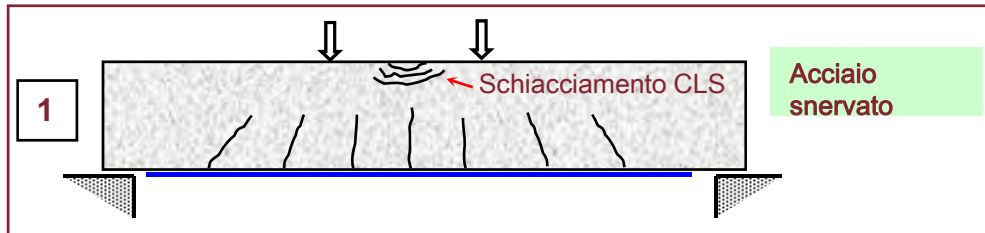


# II peeling

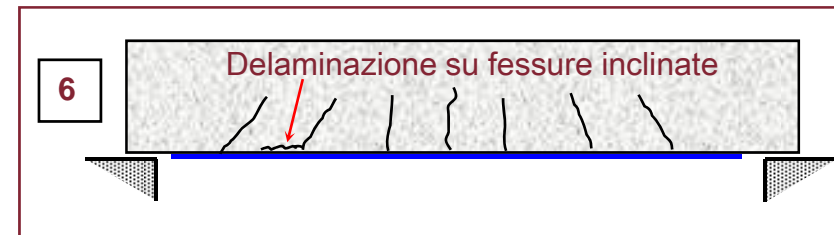
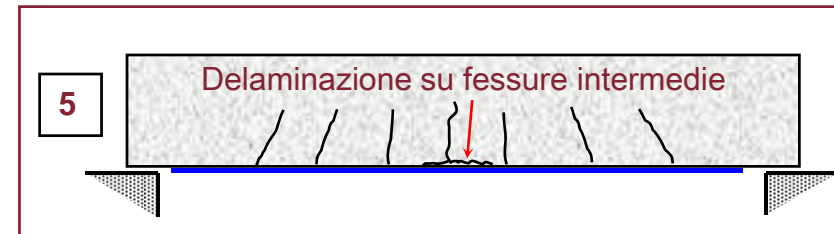
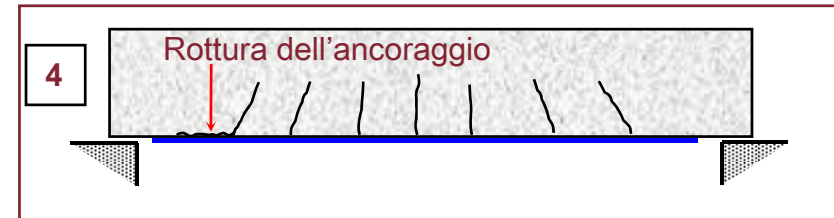


# MECCANISMI DI COLLASSO

## AZIONE COMPOSITA



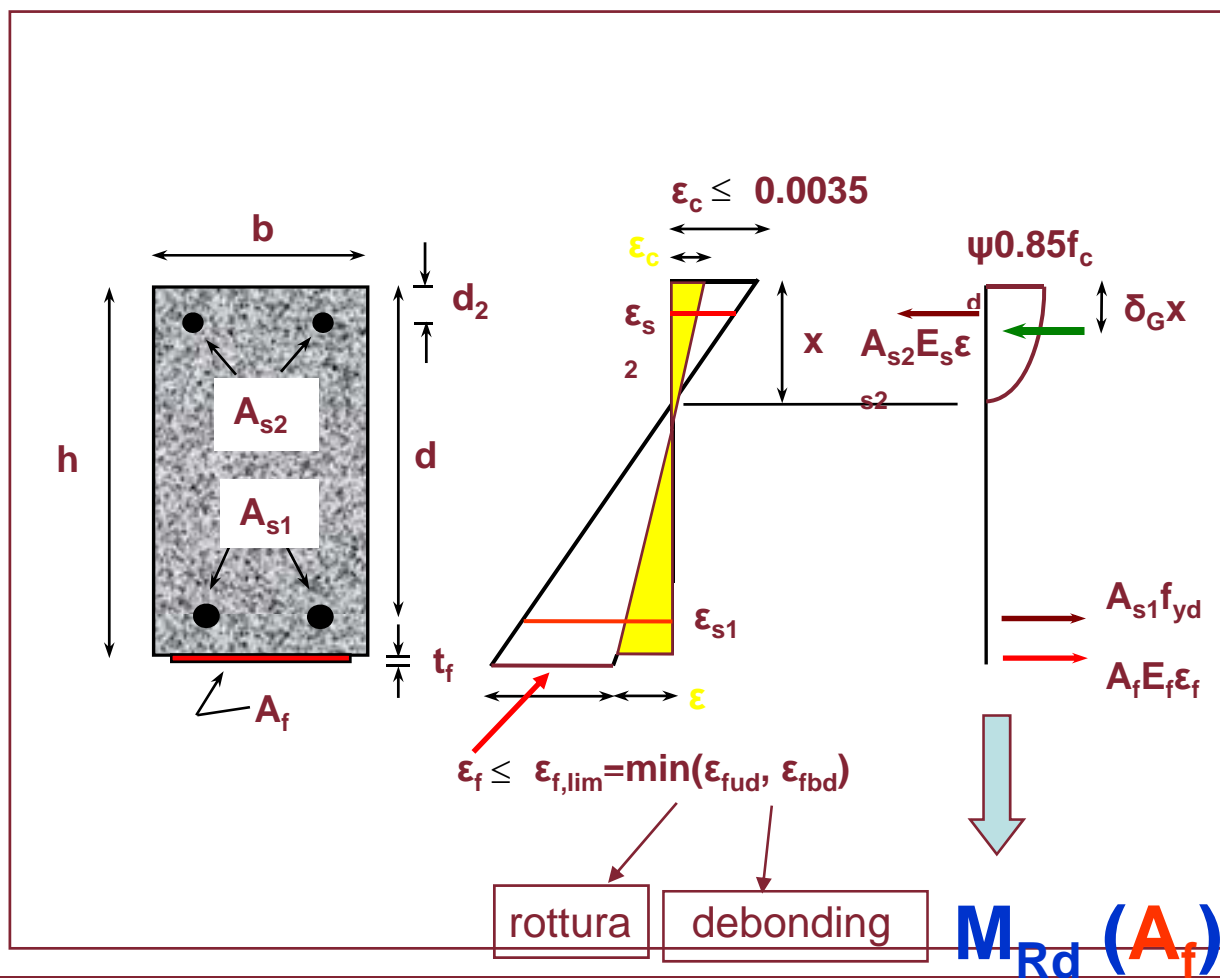
## DELAMINAZIONE



## ROTTURA DI ESTREMITA' PER TAGLIO



# ANALISI DI SEZIONE ALLO STATO LIMITE ULTIMO



# Rinforzo a taglio e torsione

Fibre orientate ( $\beta$ )	Bonding scheme and notation		
<p><math>\beta = 90^\circ</math></p>	SS90	US90	WS90
<p><math>0 \leq \beta &lt; 180^\circ</math></p>	SS $\beta$	US $\beta$	WS $\beta$
<p><math>0 \leq \beta &lt; 180^\circ, 0 \leq \phi &lt; 180^\circ</math></p>	SS $\beta/\phi$	US $\beta/\phi$	WS $\beta/\phi$
<p><math>\beta = 90^\circ</math></p>	SP90	UP90	WP90
<p><math>0 \leq \beta &lt; 180^\circ</math></p>	SP $\beta$	UP $\beta$	WP $\beta$
<p><math>0 \leq \beta &lt; 180^\circ, 0 \leq \phi &lt; 180^\circ</math></p>	SP $\beta/\phi$	UP $\beta/\phi$	WP $\beta/\phi$

## Configurazioni di rinforzo

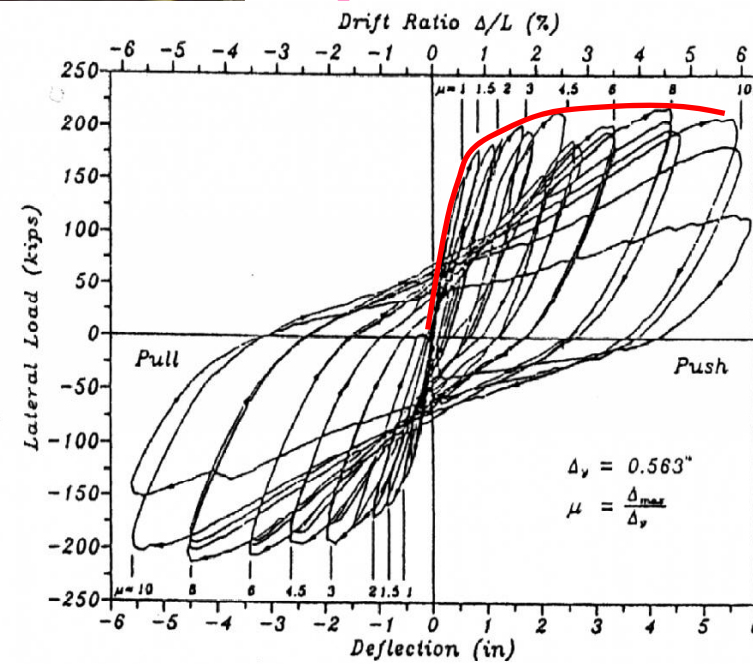
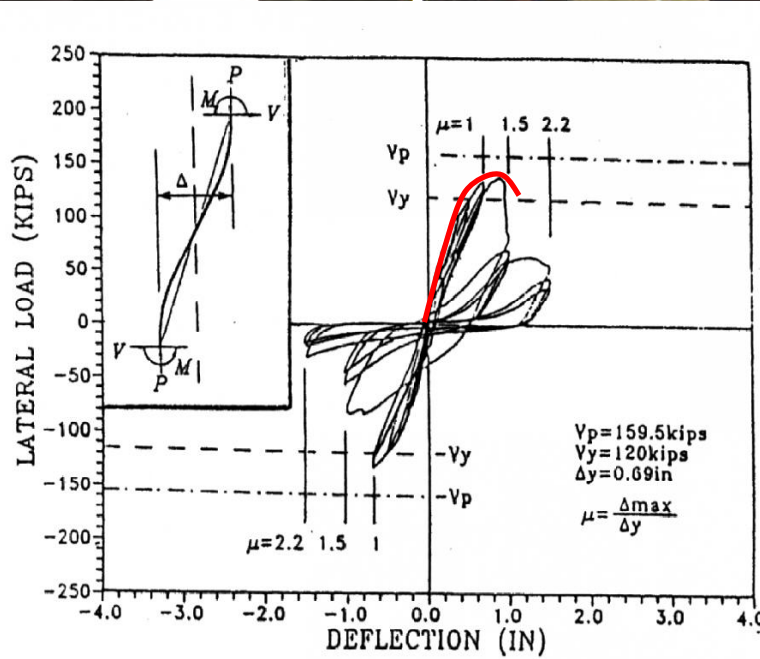
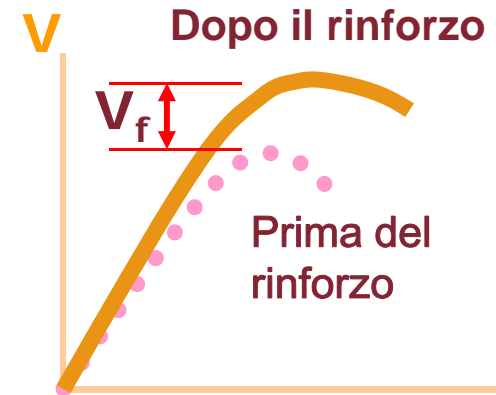
S : Side bonding

U : Strisce  
U-jacketing  
Fogli continui

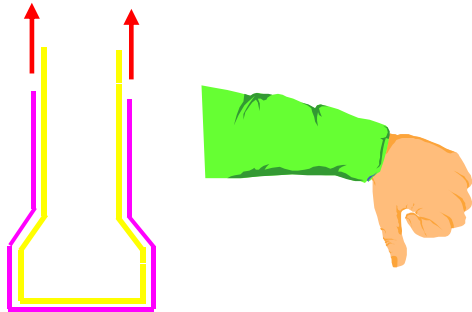
W : Wrapping



# RINFORZO A TAGLIO



8



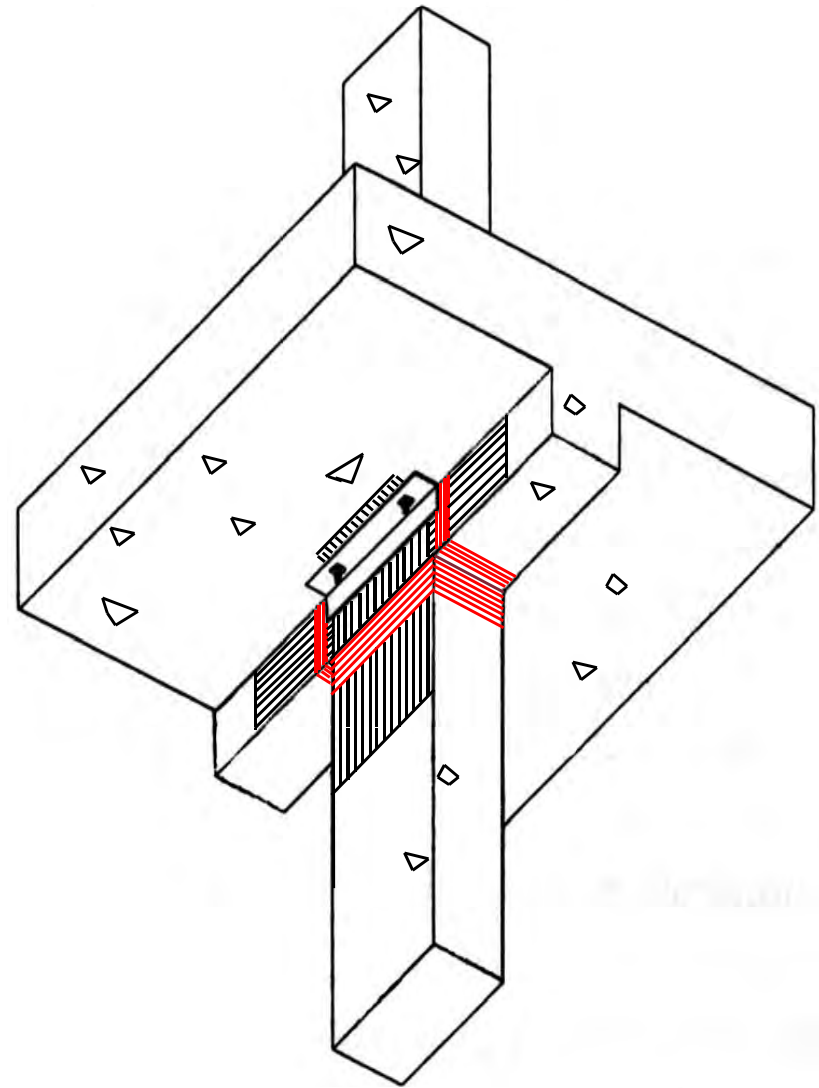
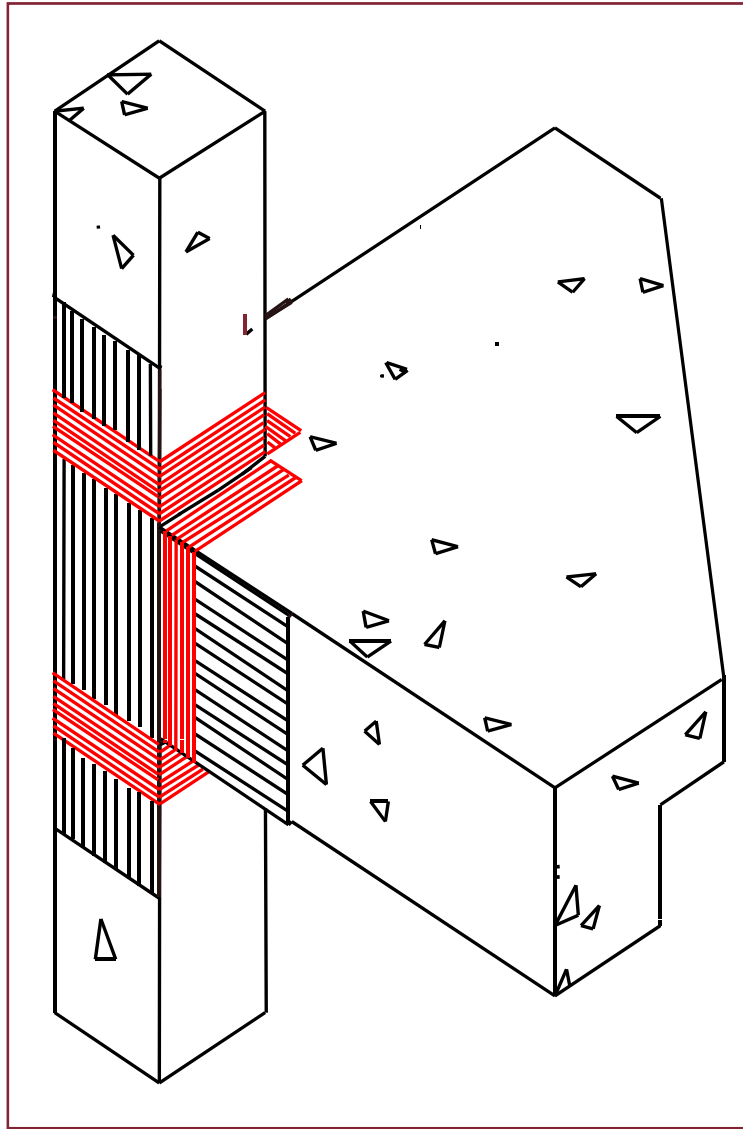


## Una prova a taglio



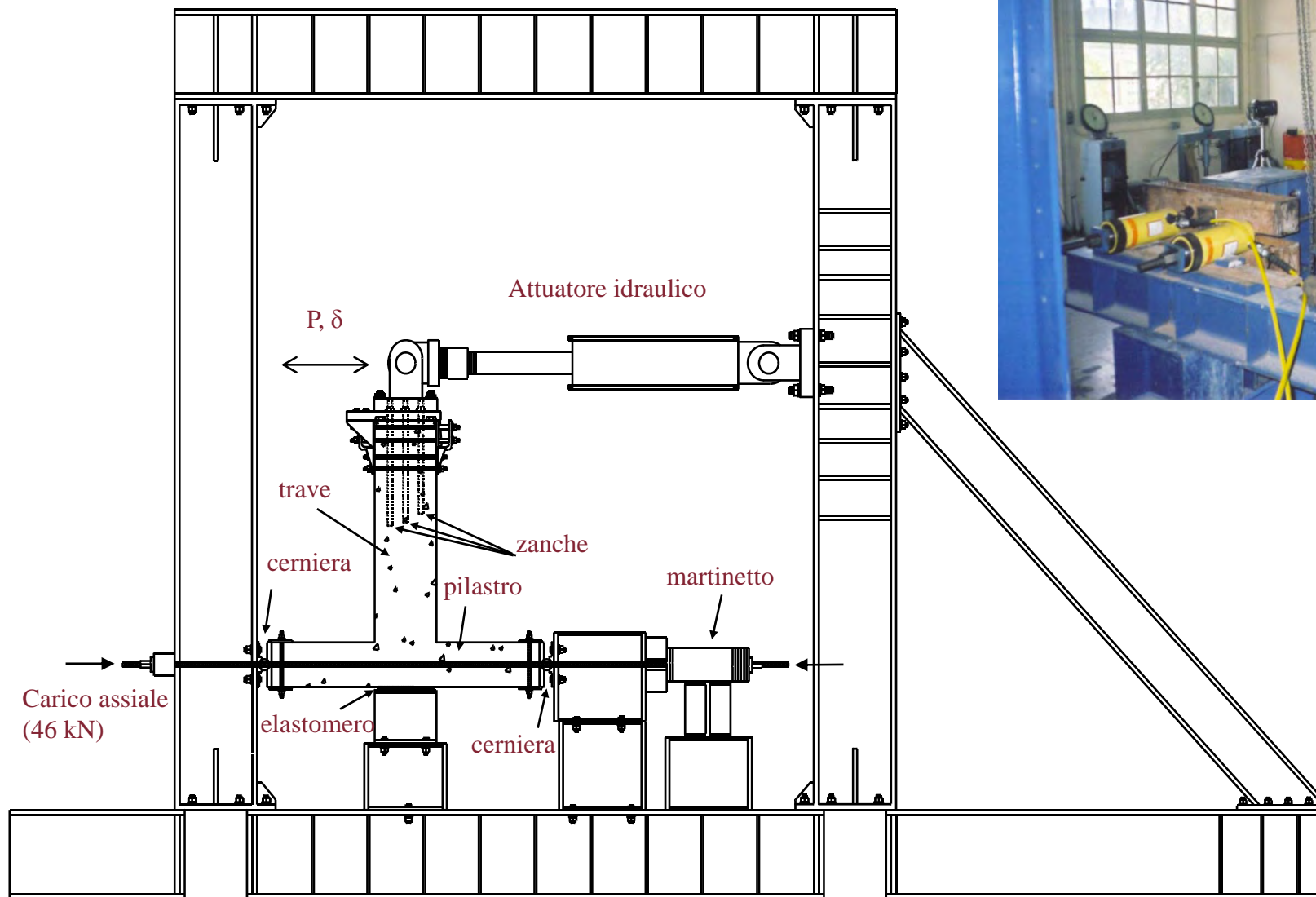
# RINFORZO DEI NODI TRAVE-PILASTRO









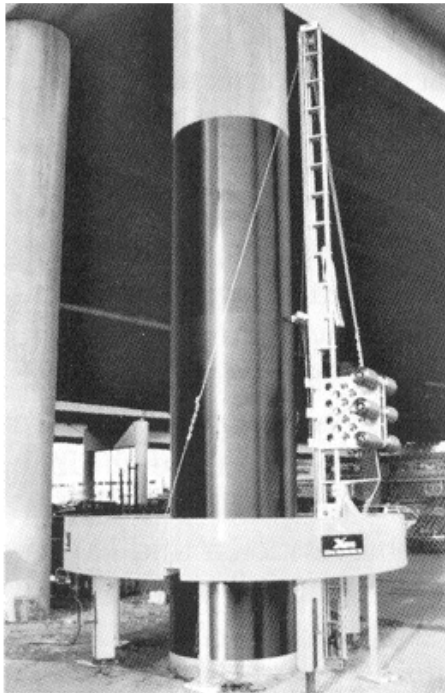


## Prova sperimentale



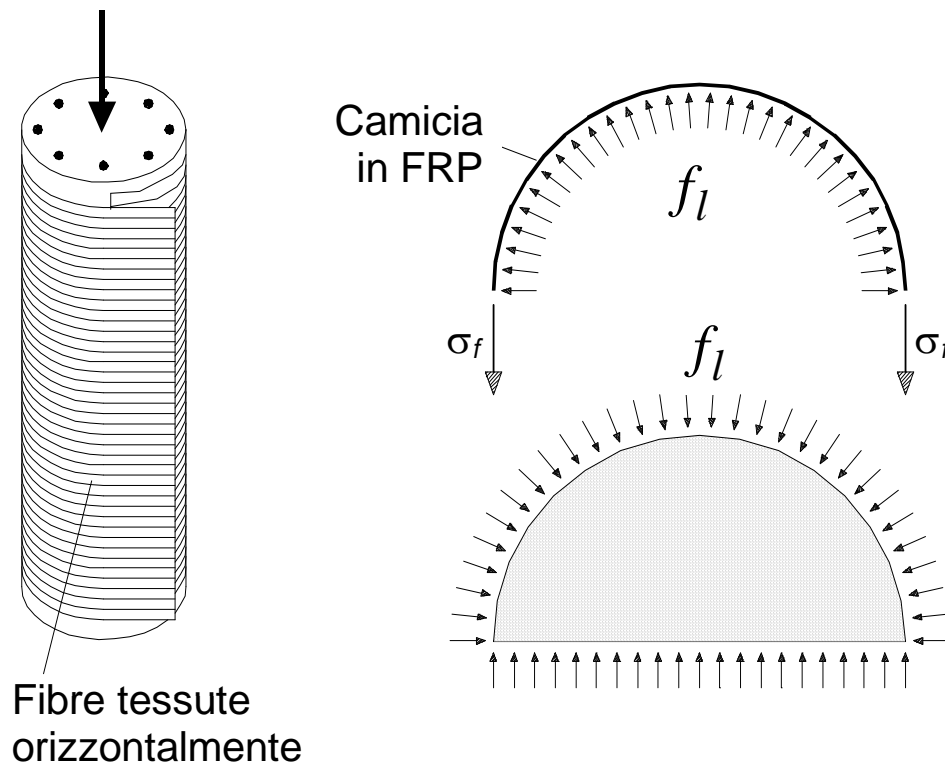


# Confinamento



# Confinamento

- Comportamento del cls confinato con FRP



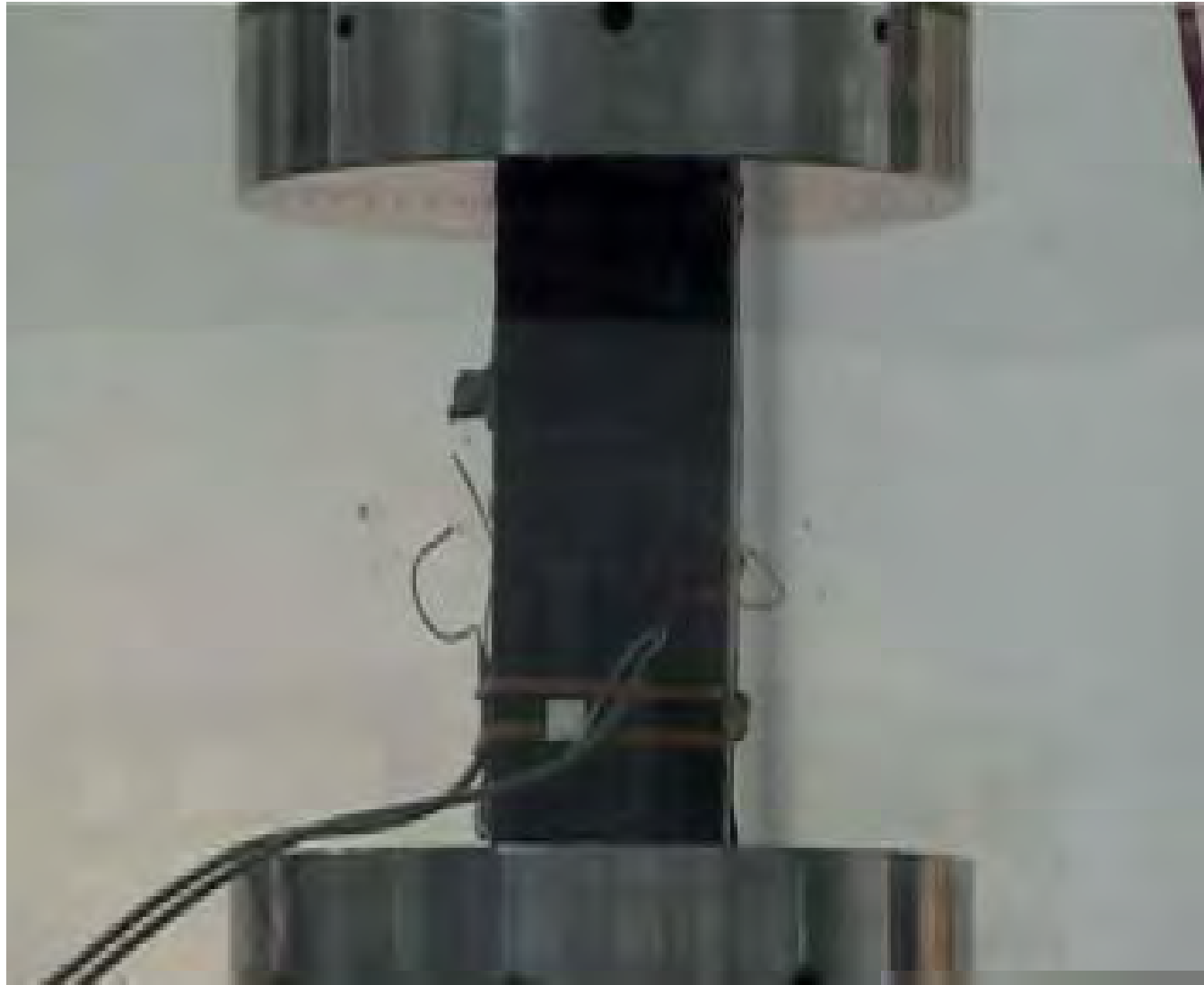
Acciaio

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

FRP

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_j E_j \varepsilon_j \quad \rho_j = \frac{4 t_j}{d_j}$$

## Prove sperimentali



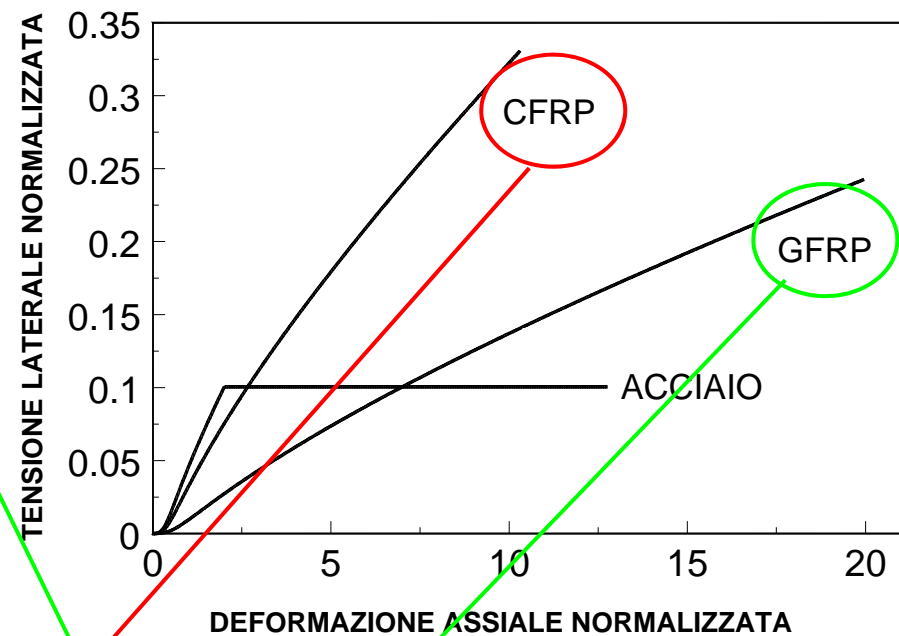
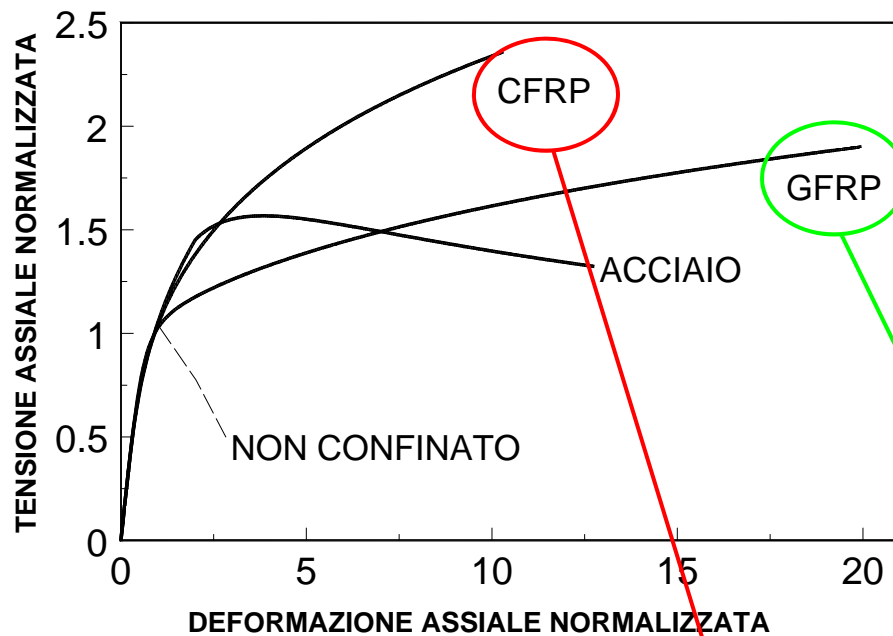


## Prove sperimentali



# Confinamento

- Comportamento del cls confinato con FRP



Più resistenza Più duttilità

# Confinamento

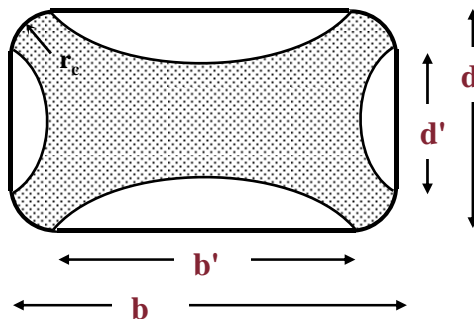
- Incremento della capacità portante
  - Effetto di arrotondamento degli spigoli
  - Confinamento con strisce
  - Influenza della forma della sezione
  - Influenza dell'orientamento delle fibre.

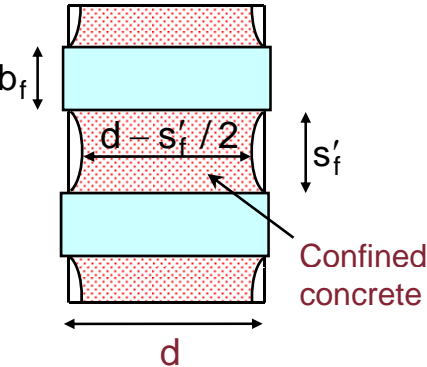


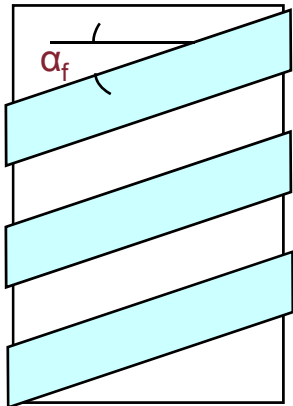
# Confinamento

- Riduzione dell'efficacia del confinamento

$$k_e = k_{e1} \times k_{e2} \times k_{e3} \leq 1$$

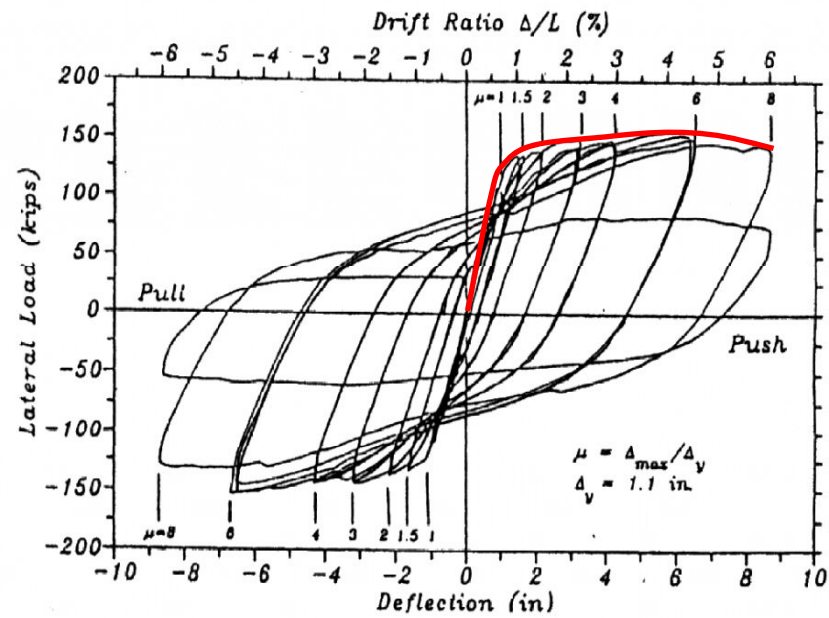
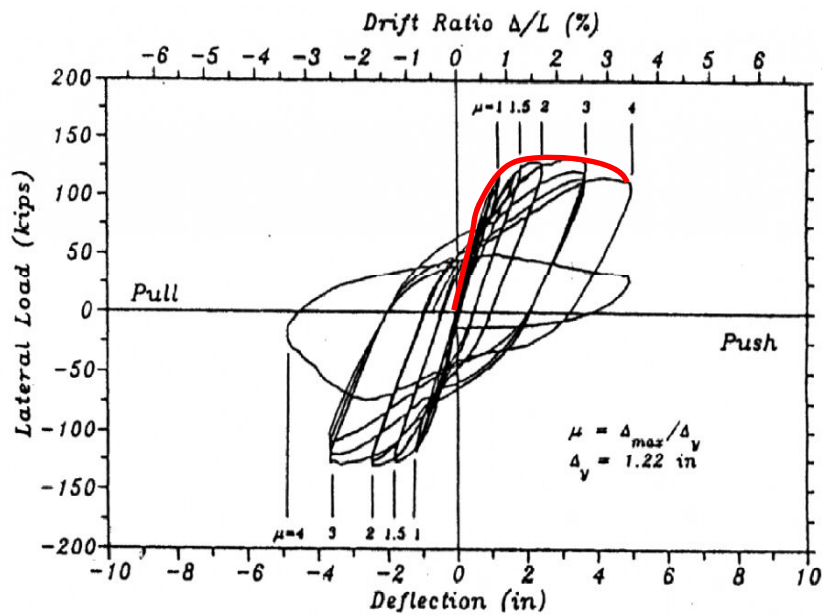


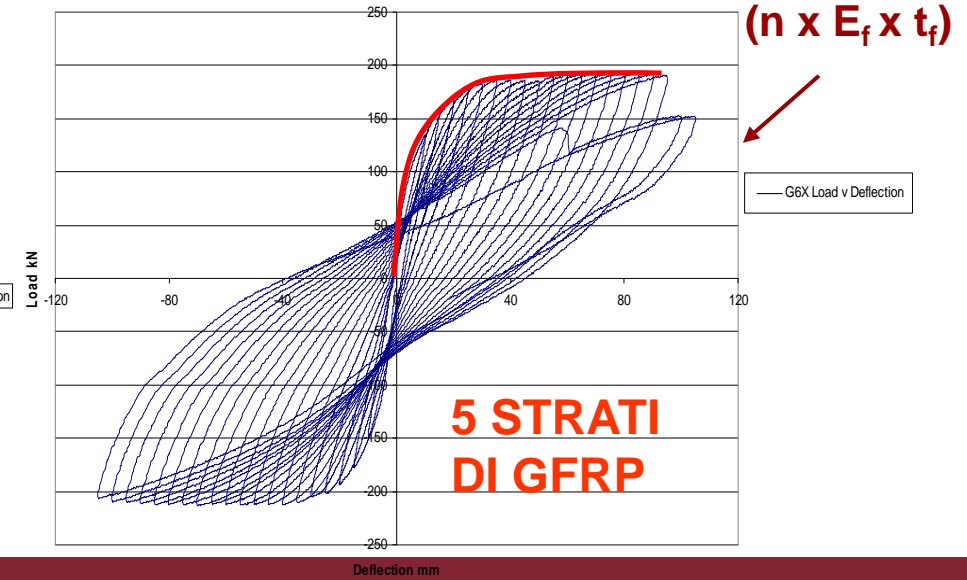
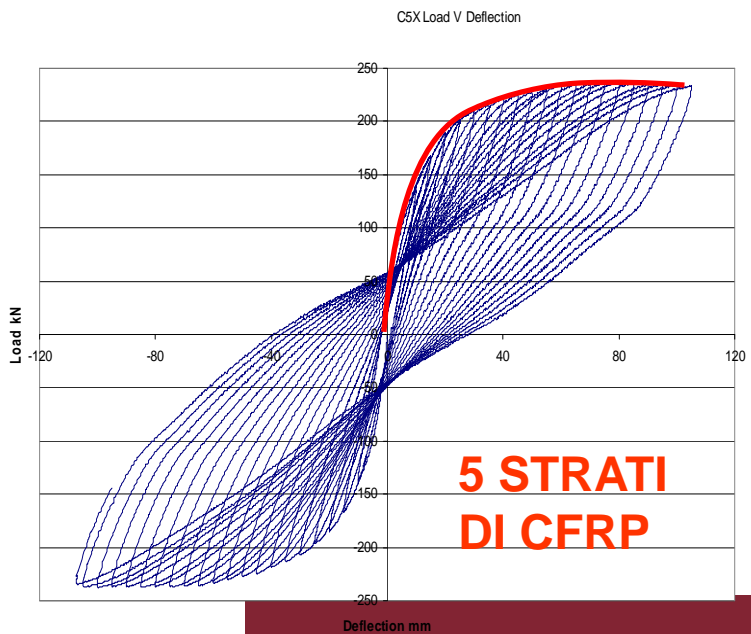
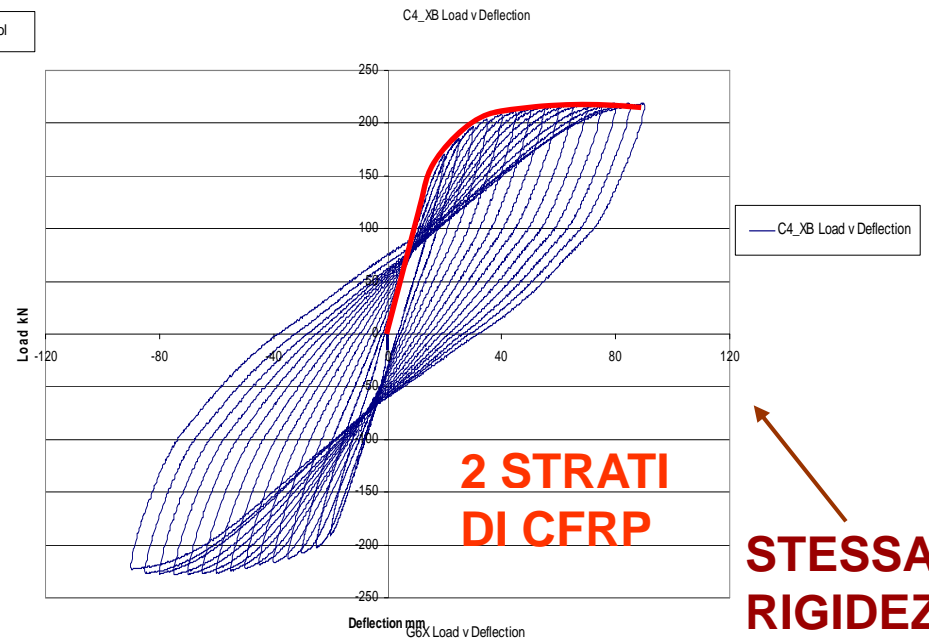
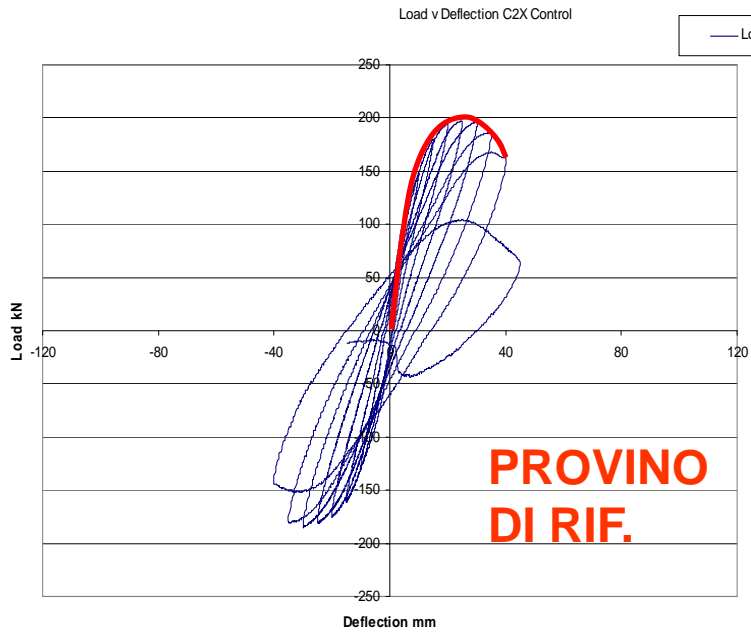
$$k_{e1} = \frac{A_e}{A_g} = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3A_g \left(1 - \frac{A_s}{A_g}\right)}$$


$$k_{e2} = \frac{\left(1 - \frac{s_f}{2d}\right)^2}{1 - \frac{A_s}{A_g}}$$


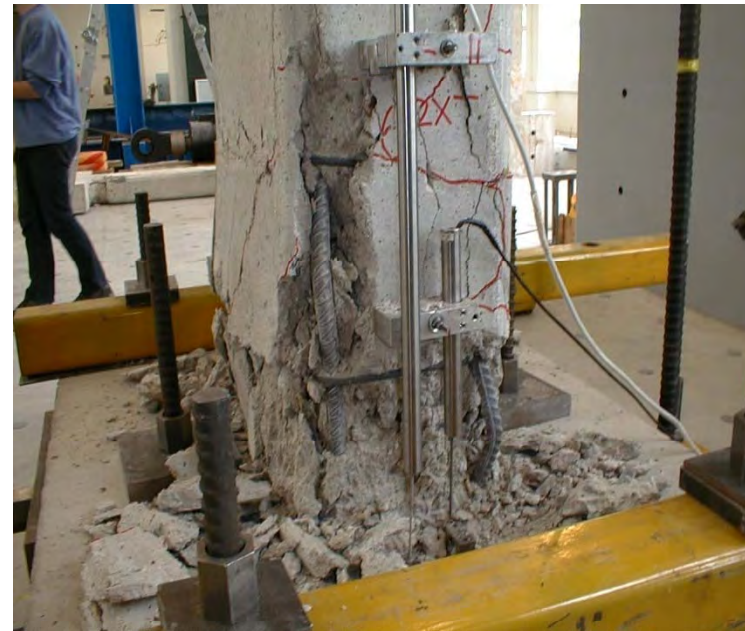
$$k_{e3} = \frac{1}{1 + (\tan \alpha_f)^2}$$

# INCREMENTO DUTTILITA' IN SPOSTAMENTO



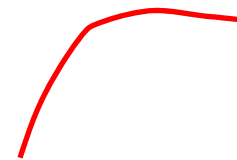
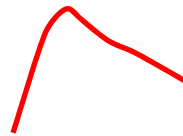
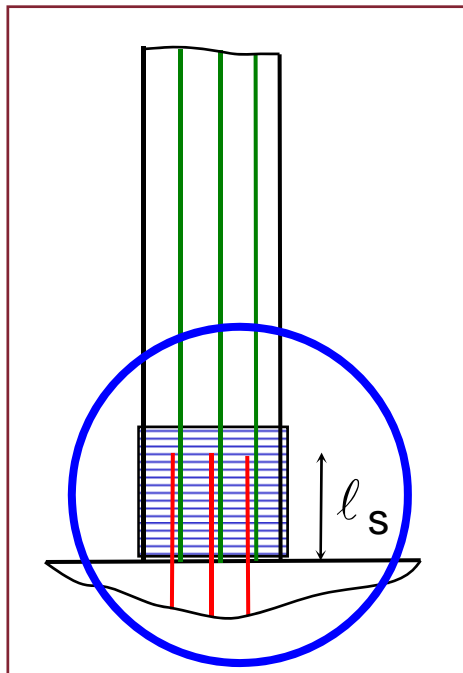






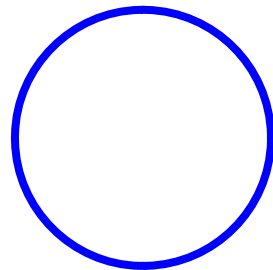
# Confinamento

- Zone di sovrapposizione



# Confinamento

- Svergolamento delle armature



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

**n** = numero totale di barre

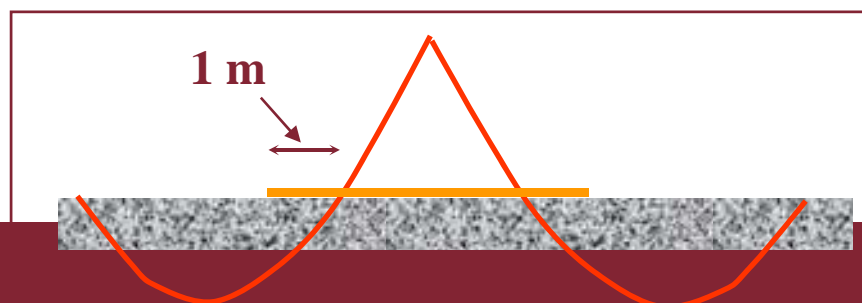
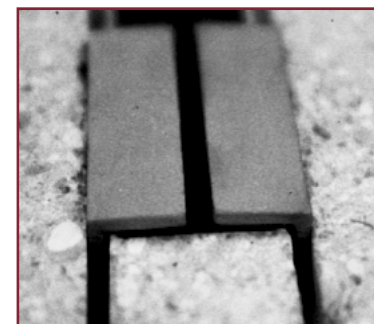
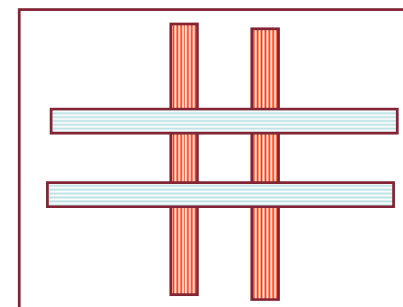
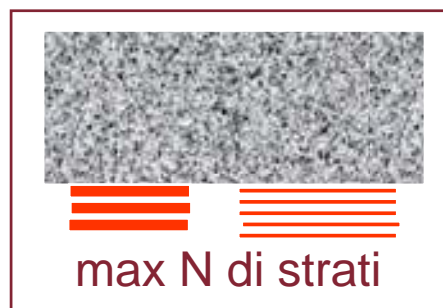
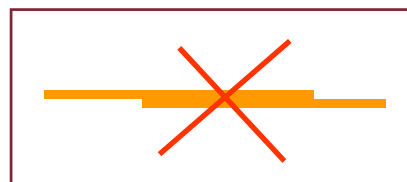
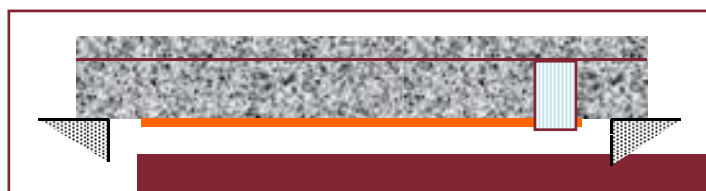
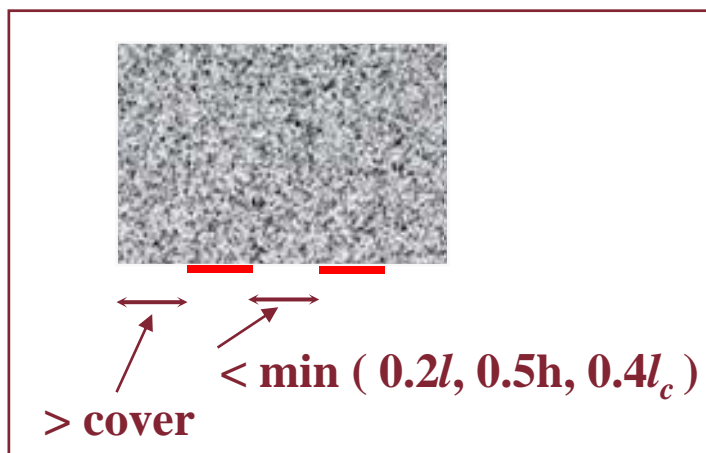
**d** = dimensione della sezione  
parallela al piano di inflessione

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



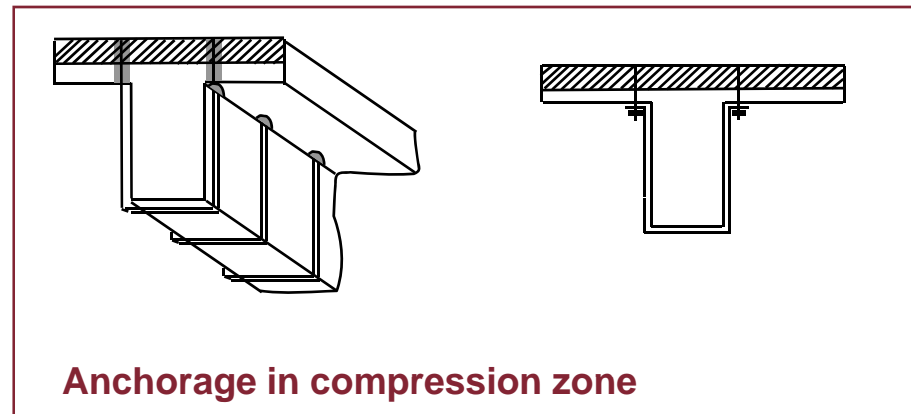
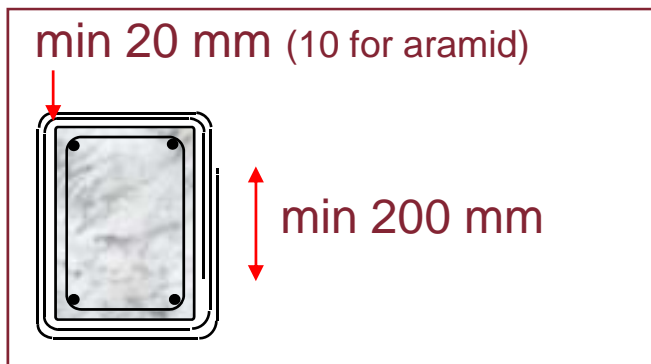
# Dettagli costruttivi

- Flessione



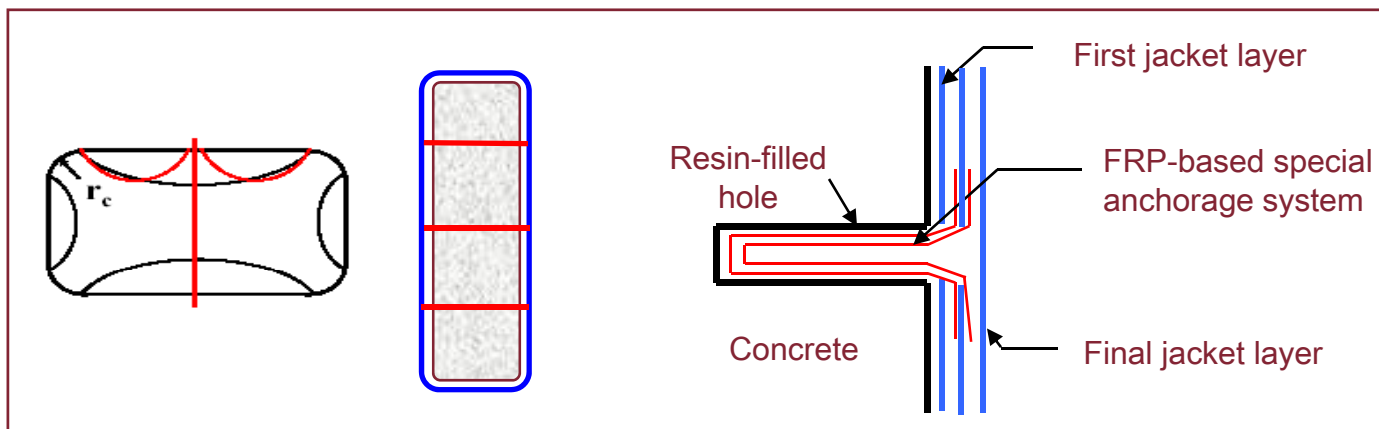
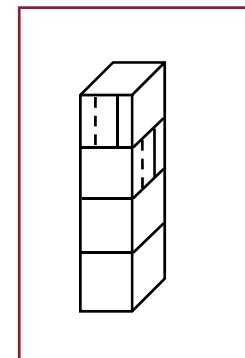
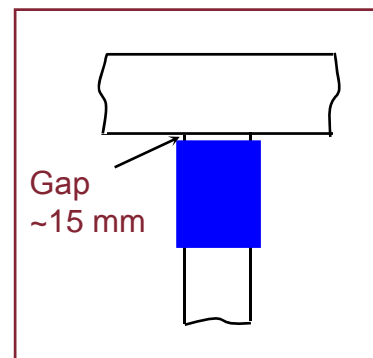
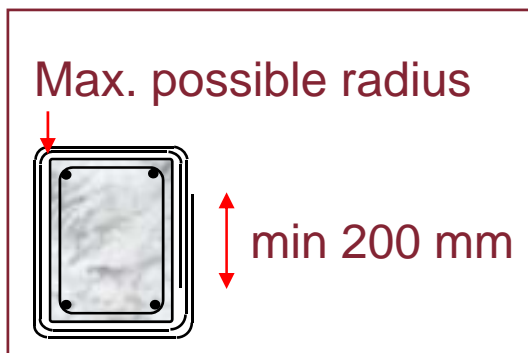
## Dettagli costruttivi

- Taglio



# Dettagli costruttivi

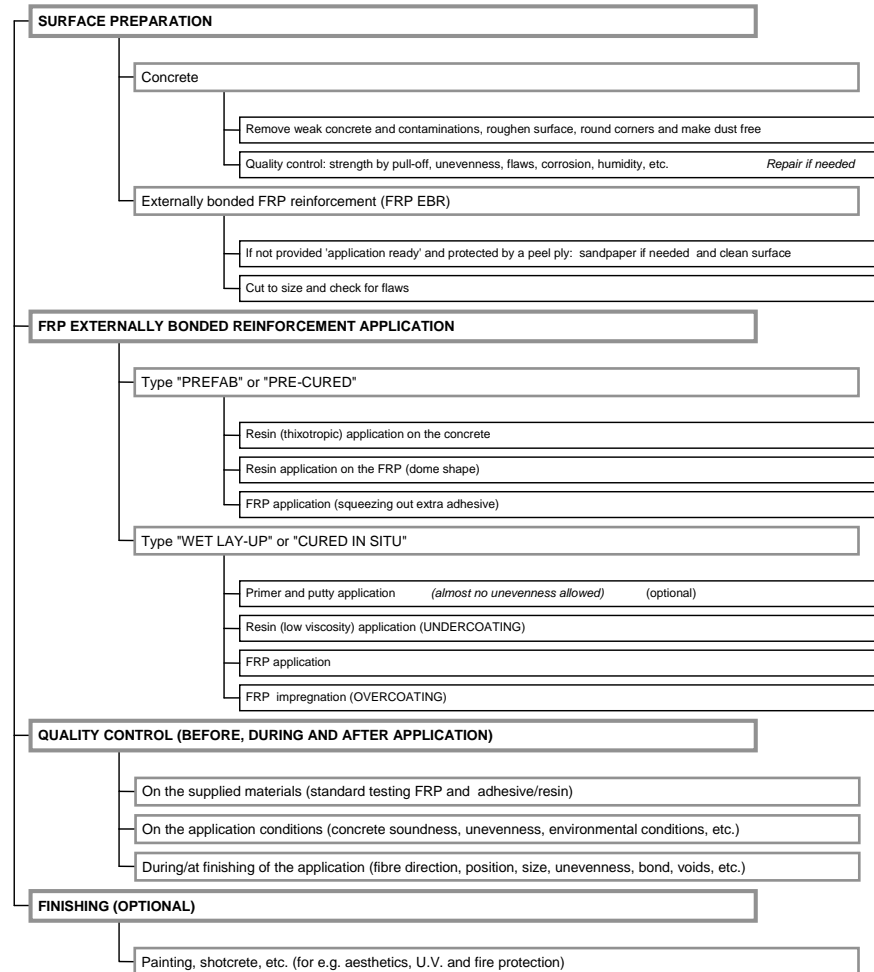
- Confinamento





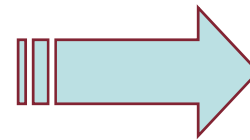
# Esecuzione e controllo di qualità

- Tecniche
- Requisiti generali
- Regole di esecuzione
  - Riparazione
  - Preparazione superfici
  - Applicazione FRP
  - Finitura



# Esecuzione e controllo di qualità

- Controllo di qualità
  - Dei materiali
  - Delle maestranze
  - Dell'esecuzione
  - Qualità dell'aderenza dopo l'esecuzione
  - Ispezione e manutenzione



Specifiche di  
applicazione

# Esecuzione e controllo di qualità

