

## SULL'UTILIZZO DEGLI FRP PER IL RINFORZO DELLE COSTRUZIONI IN MURATURA



**Prof. Ing. Antonio Borri**

Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale

Facoltà di Ingegneria

Università degli Studi di Perugia

## Coautori e collaboratori:

Ing. G. Castori

Ing. M. Corradi

Ing. A. Grazini

*Dip. Ing. Civile ed Ambientale  
Università degli Studi di Perugia*

Ing. G. Celestini - Tec Inn

Ing. A. Giannantoni

*Servizi di Ingegneria s.r.l. – Foligno*

Ing. R. Vetturini – Foligno

## Riferimenti:

- E-mail: [borri@unipg.it](mailto:borri@unipg.it)
- Sito: [www.mastrodicasa.com](http://www.mastrodicasa.com)
- Sito: [www.strutture.unipg.it/scienza](http://www.strutture.unipg.it/scienza)
  
- “Manuale per la riabilitazione e la ricostruzione post-sismica degli edifici”, Regione Umbria, Ed. DEI, Roma, 1999.
- “Trattato sul Consolidamento” Ed. Mancosu, Roma, 2003.
- “Consolidamento e rinforzo delle strutture con materiali compositi (FRP)”, Ed. DEI, Roma, 2004.
- “Manuale del legno strutturale” Vol. 3 – Ed. Mancosu, Roma, 2004.

## Premesse

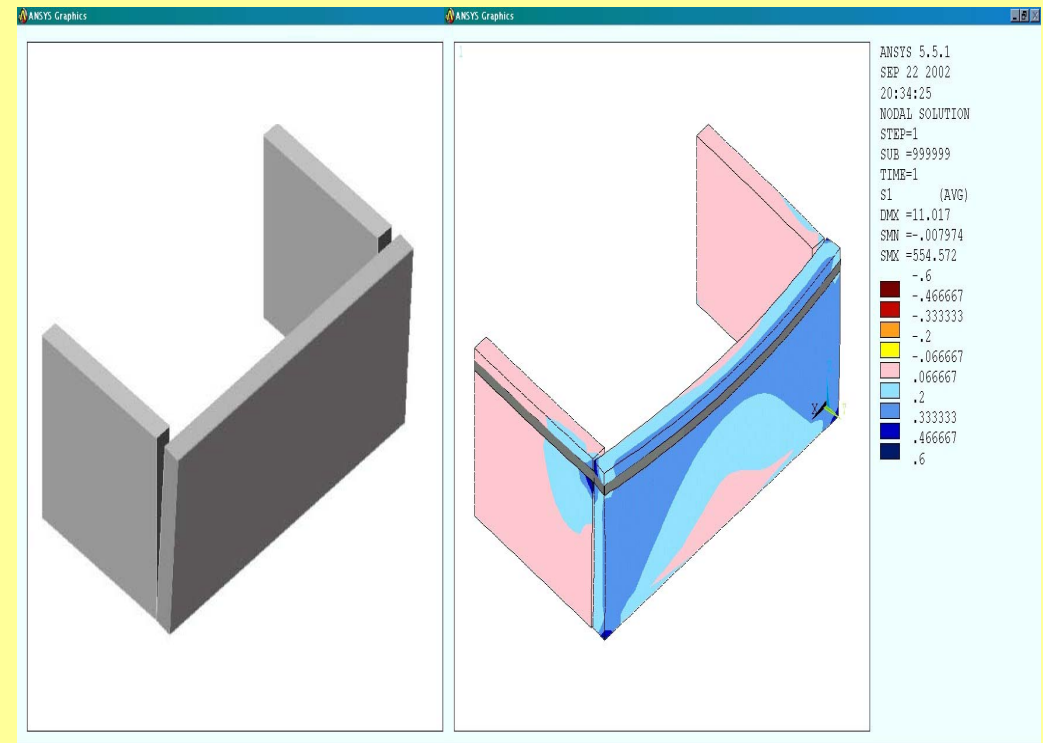
- Sequenza metodologica: analisi-diagnosi-terapia
- “Conoscenza” come base indispensabile per l'intervento
- Particolarità delle costruzioni in muratura ...

## **Interventi con FRP**

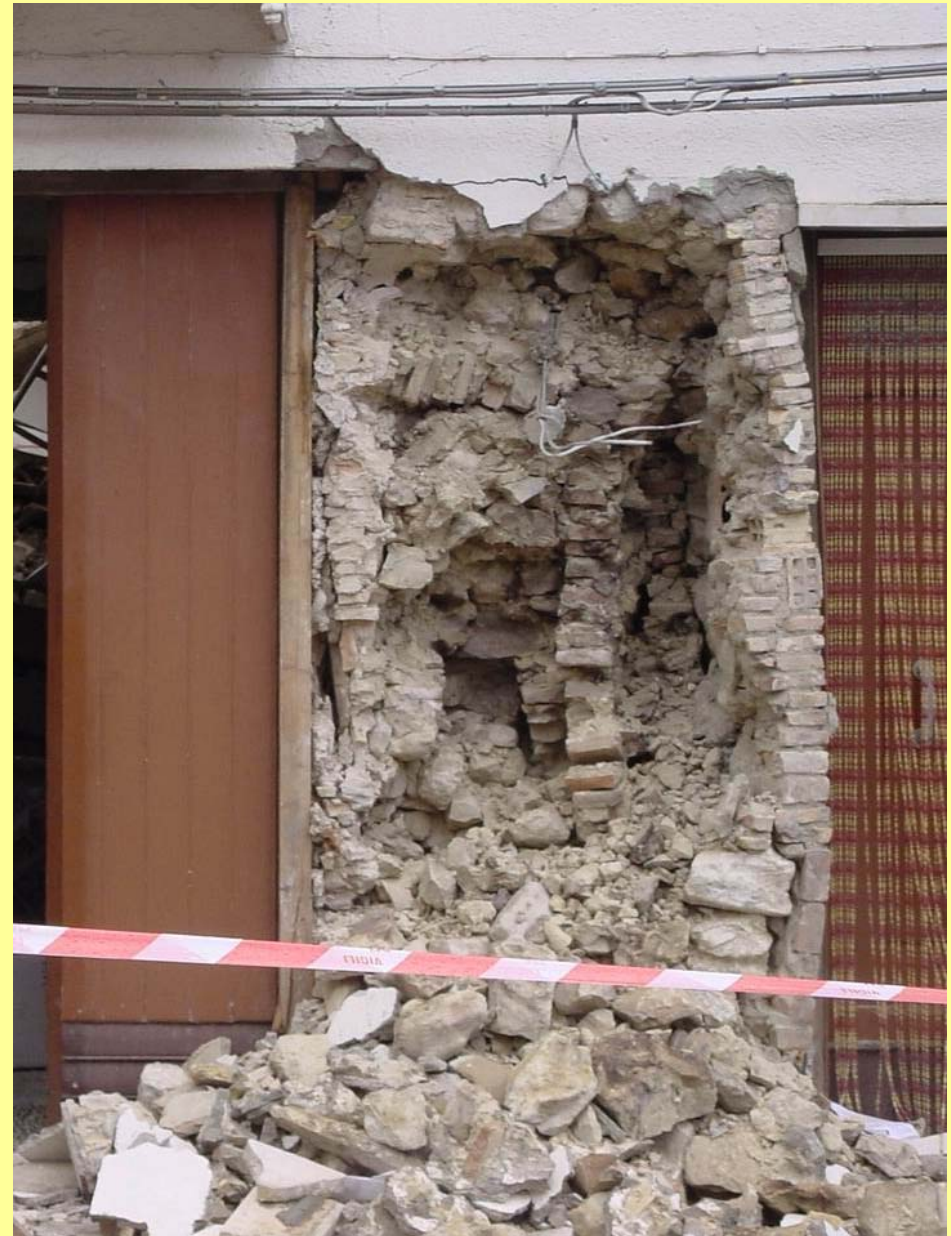
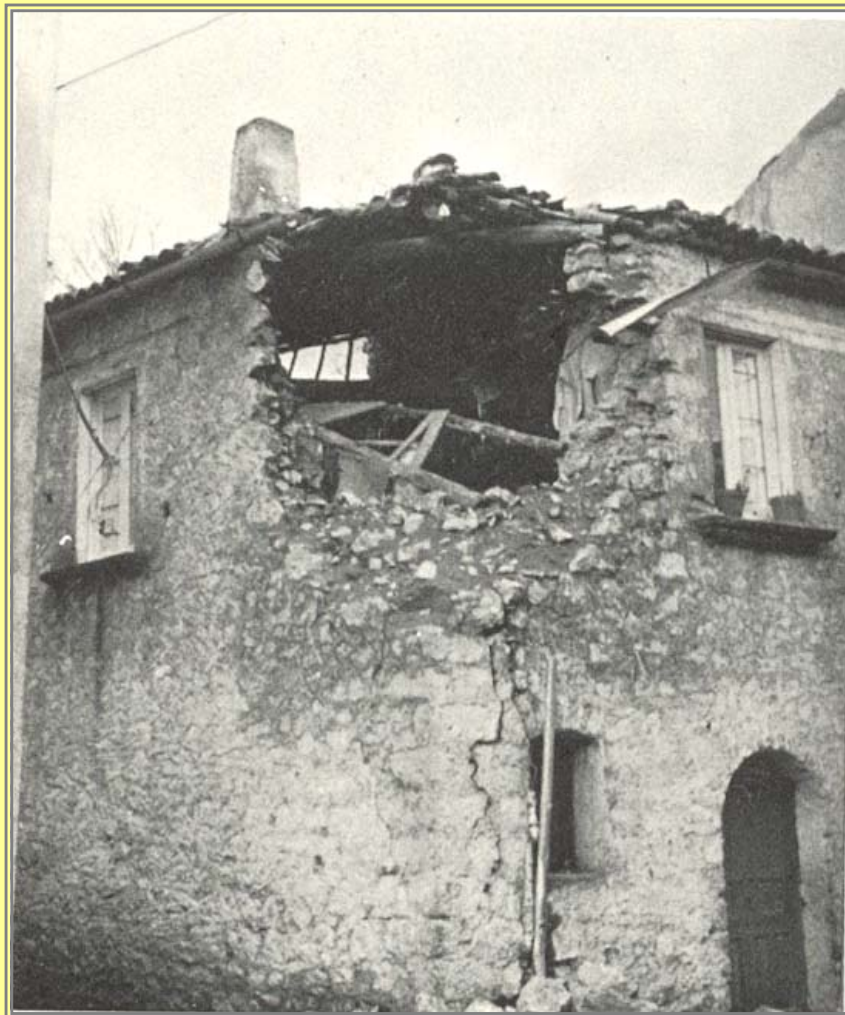
- A) INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO SISMICO  
DEGLI EDIFICI IN MURATURA
  
- B) INTERVENTI DI RINFORZO

## Interventi di miglioramento sismico

- Ricerca di una efficacia su un elemento o sul complesso, non come rinforzo puntuale.
- Impedire l'evolversi di meccanismi di collasso.
- Presidi e non stravolgimenti del normale funzionamento strutturale.



## Importanza della qualità muraria



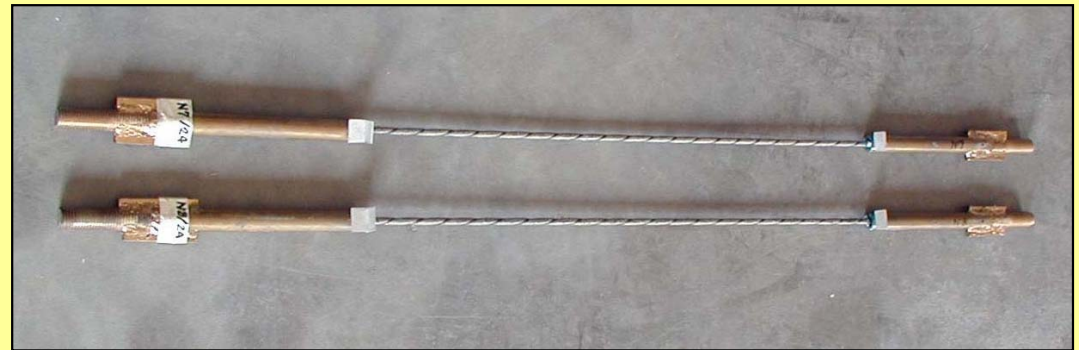




## Dispositivi di collegamento

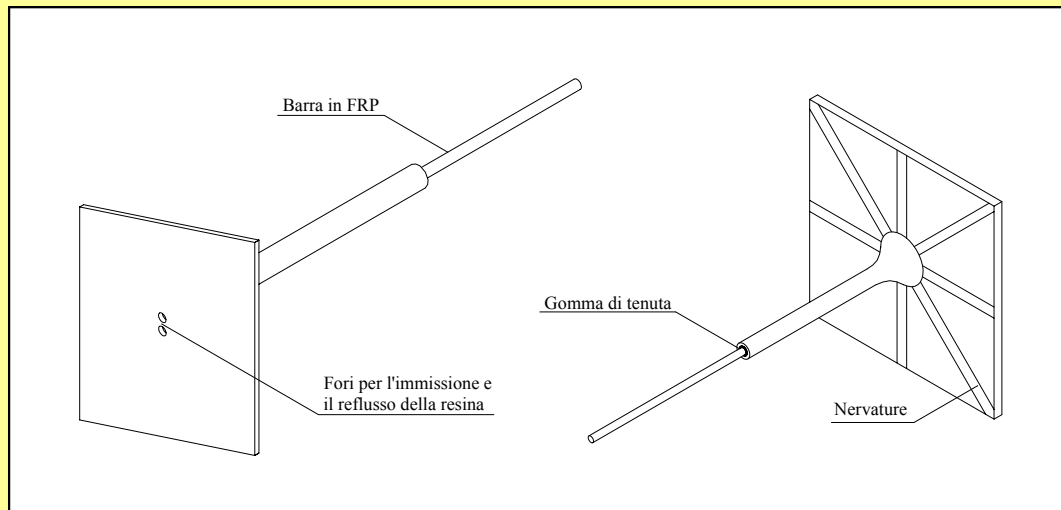
### SOLUZIONI MISTE: ACCIAIO - COMPOSITO

- INFLUENZA QUALITÀ RESINA
- NECESSITA' FILETTATURA INTERNA ACCIAIO



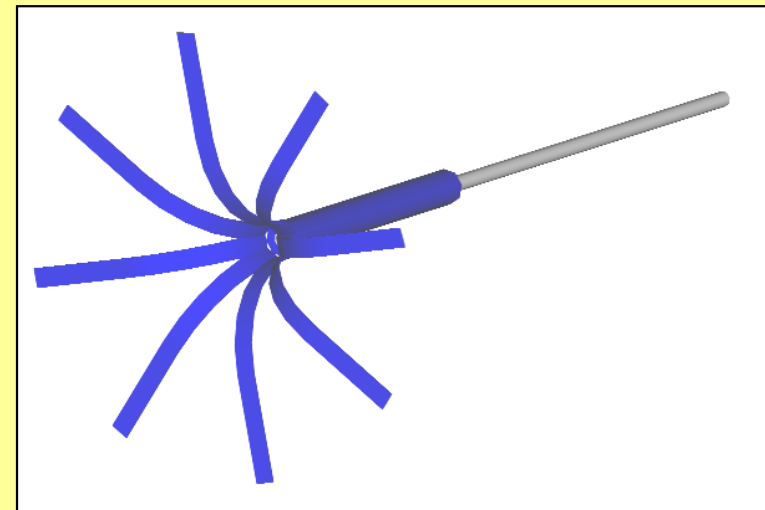
### DISPOSITIVI PRESTAMPATI

- MECCANIZZAZIONE DELL'INTERVENTO
- RIDUZIONE DEI TEMPI DI POSA IN OPERA

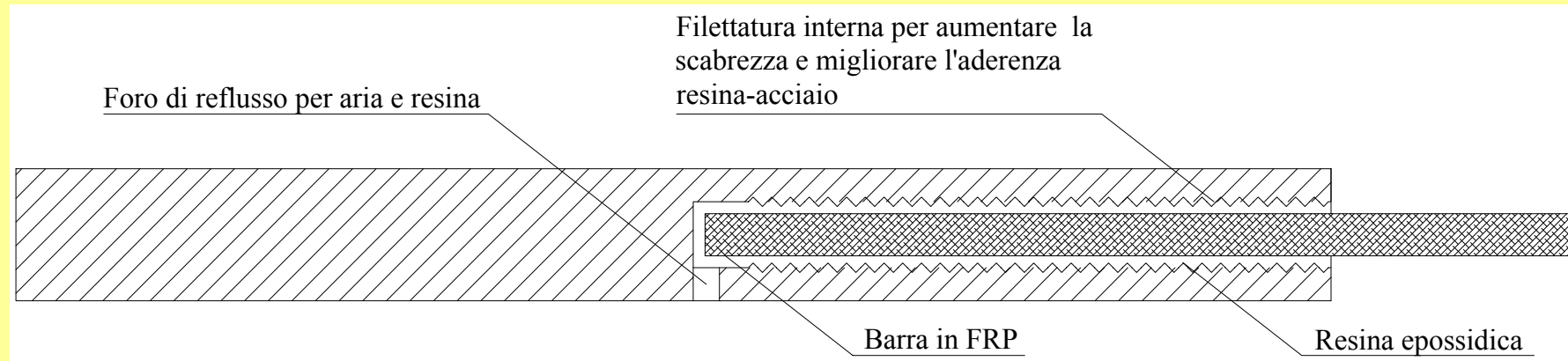


### BARRE E NASTRI

- OCCORRE MALTA DI ALLETTAMENTO
- LABORIOSITA' DELLA POSA IN OPERA



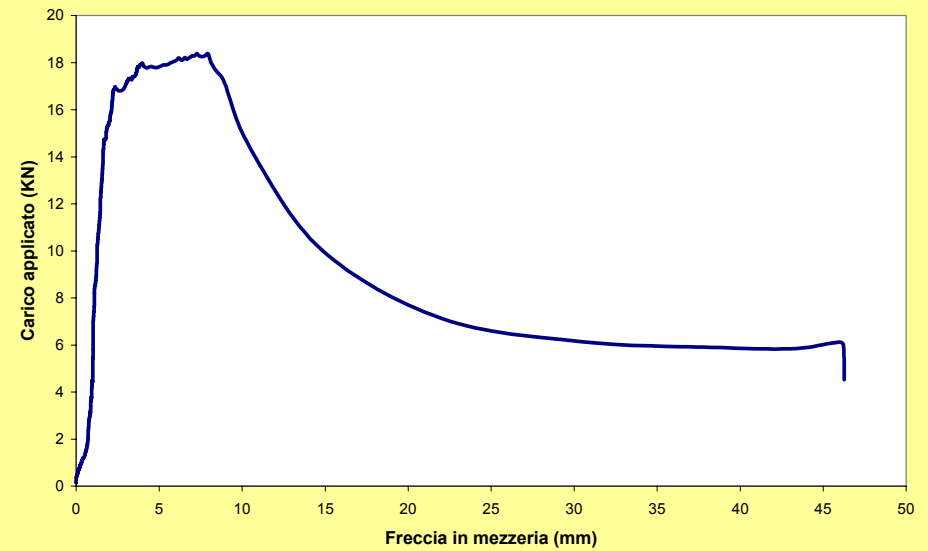
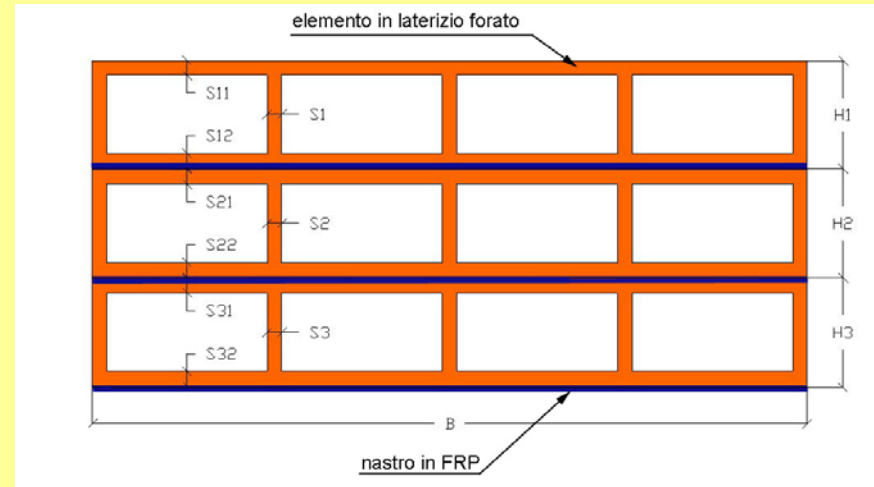
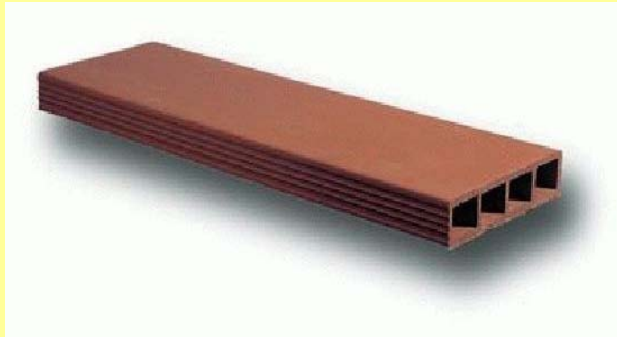
## Collegamenti



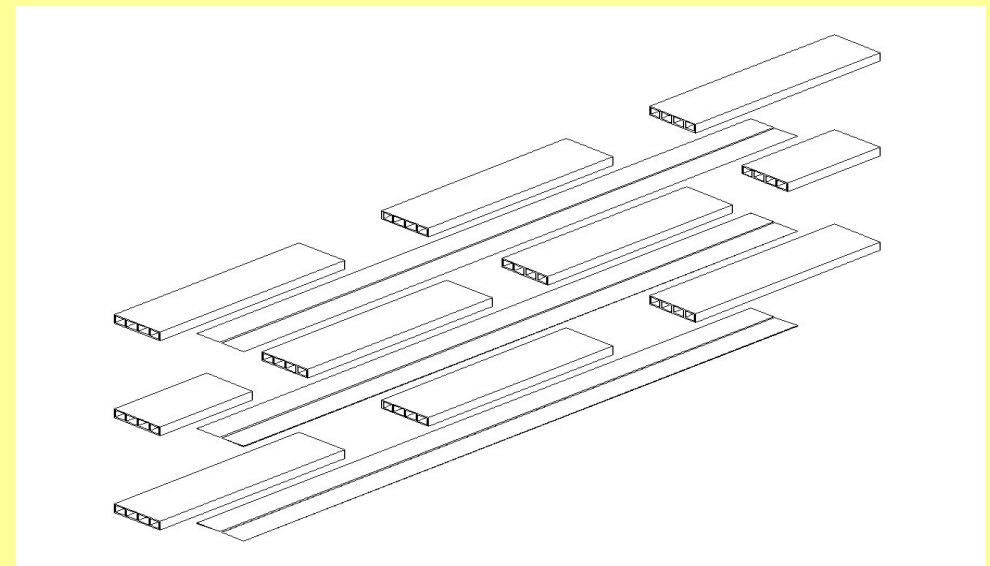
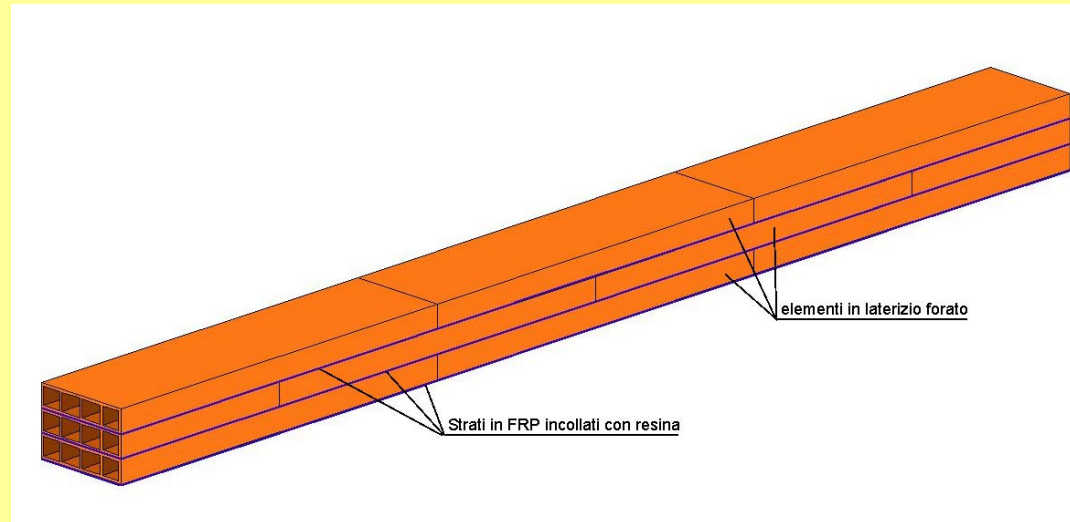
**Soluzione “ibrida”:**

**particolare del manicotto utilizzato per l’ancoraggio delle barre.**

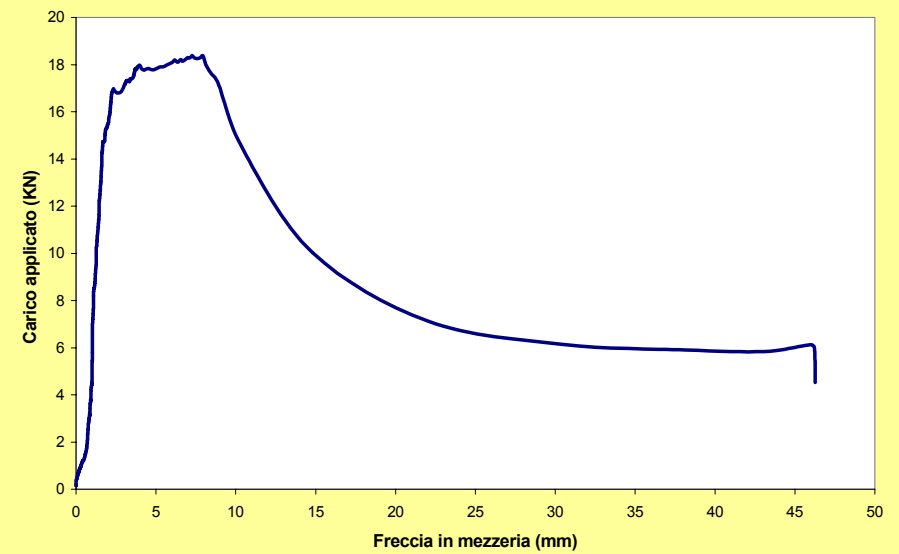
## Architrave in laterizio armato con FRP



## Laterizio lamellare (brevetto e marchio dep.)

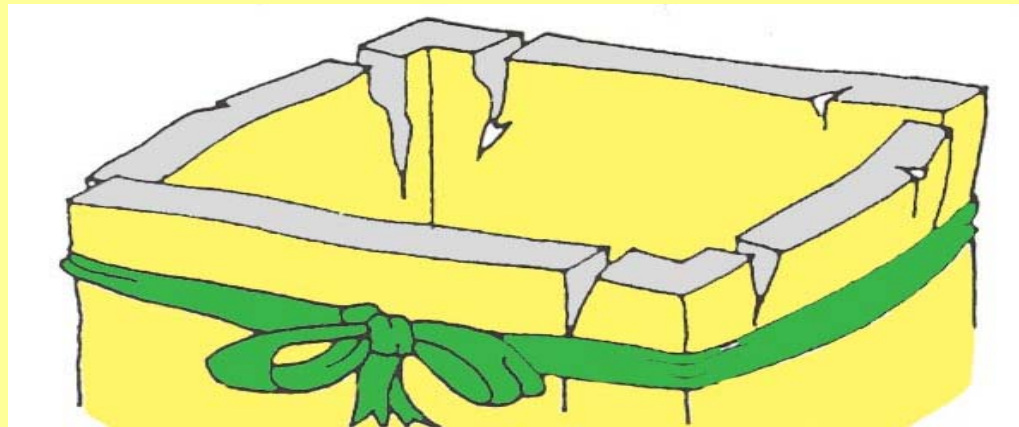


## Prove sperimentali

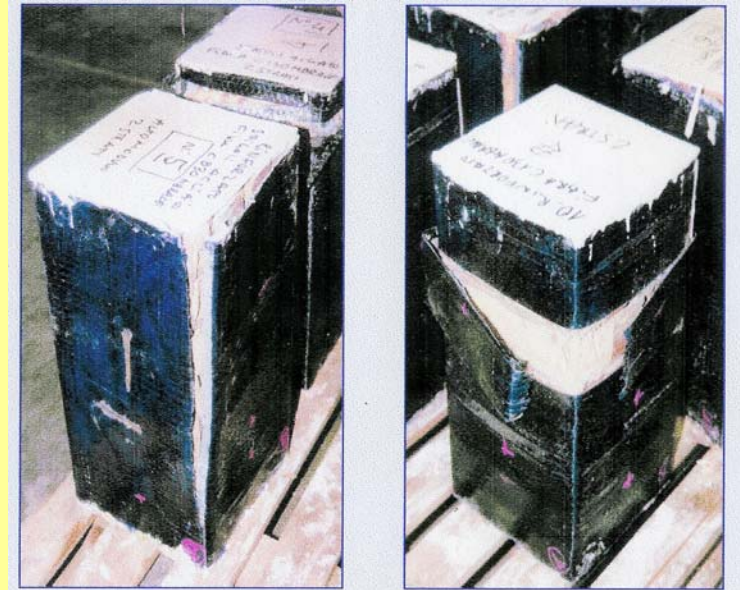
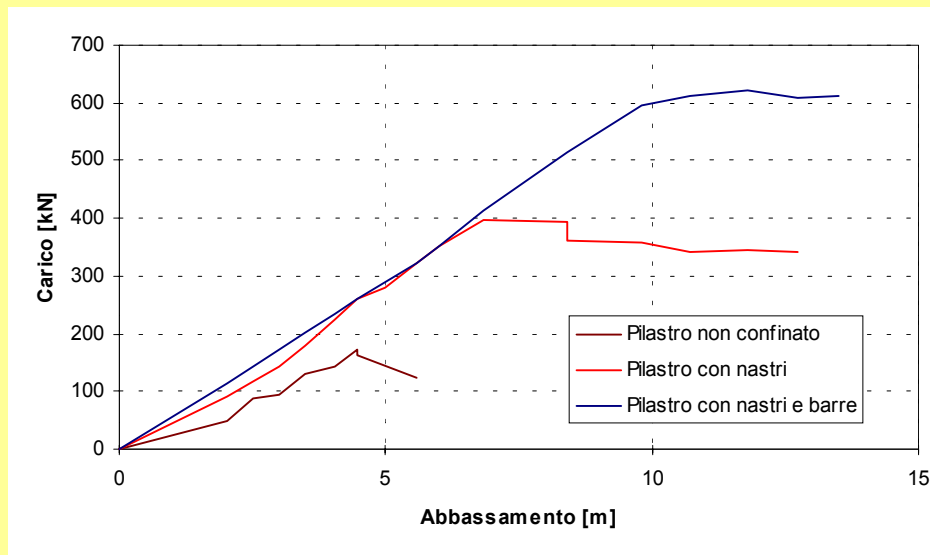
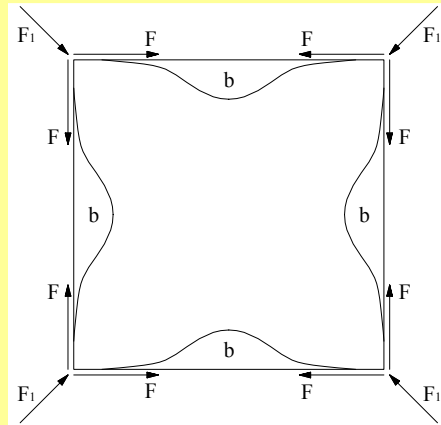
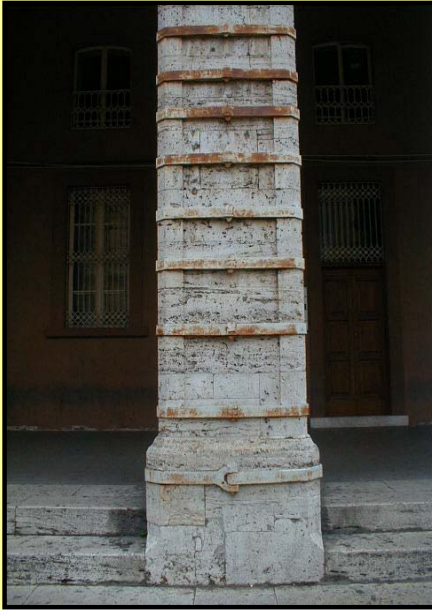


Su nn. 127 e 128 di “L’edilizia” – Ed. De Lettera

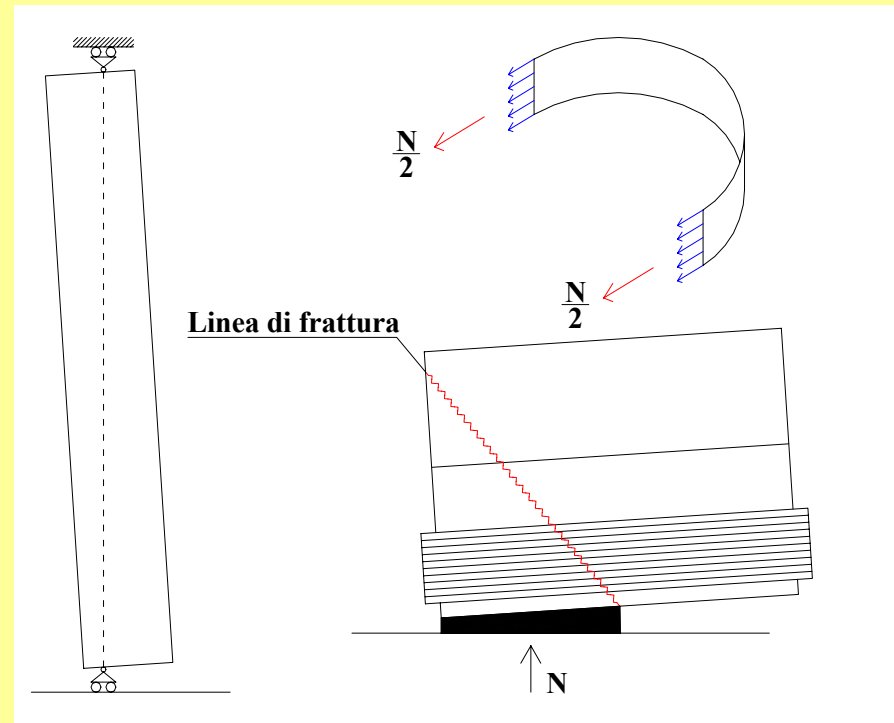
## Cerchiature



## Cerchiatura di pilastri

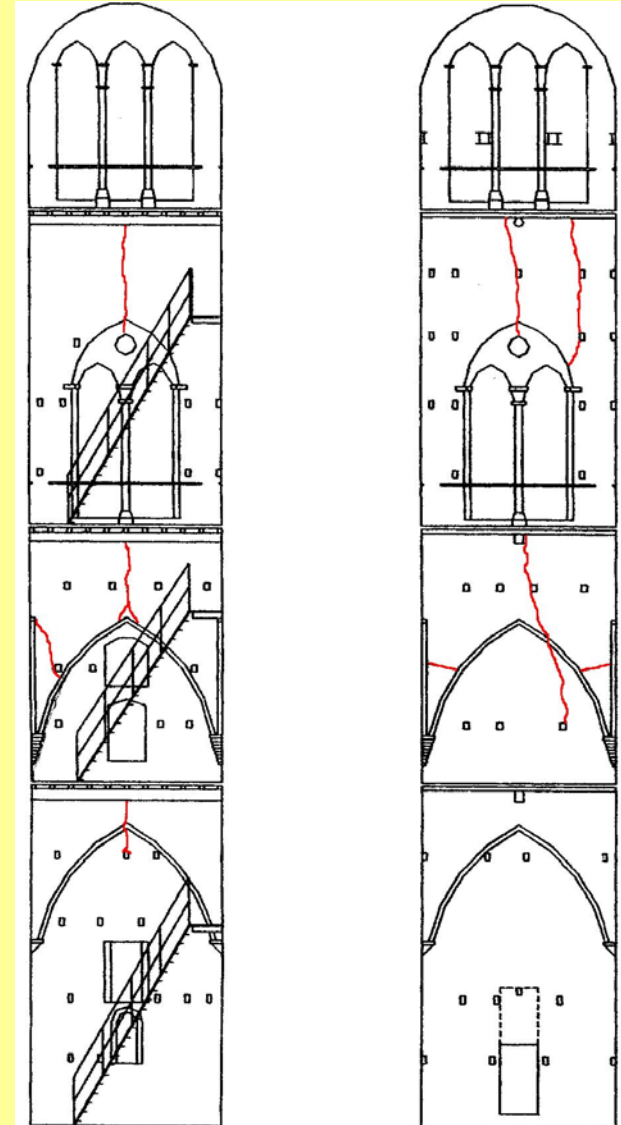


## Cerchiatura della base di colonne (rinforzo a taglio)

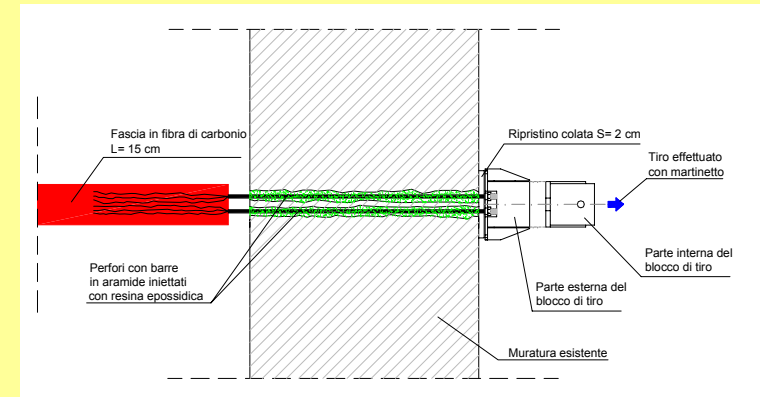
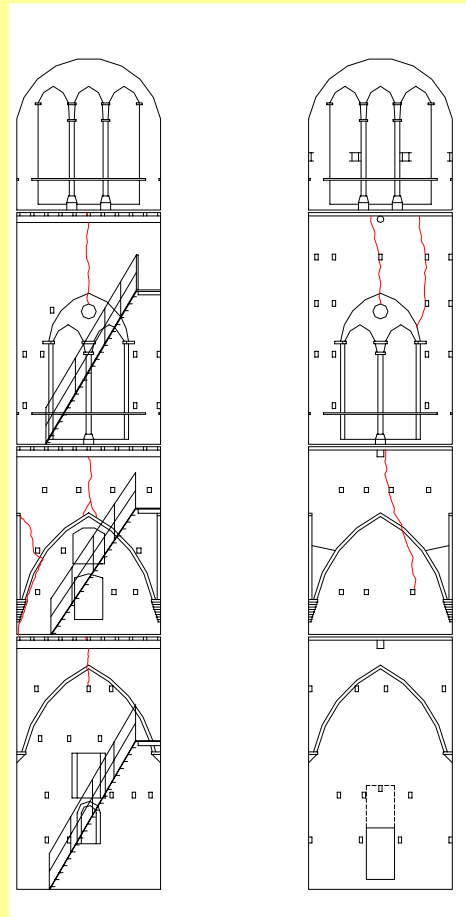




# Cerchiatura di torri e campanili

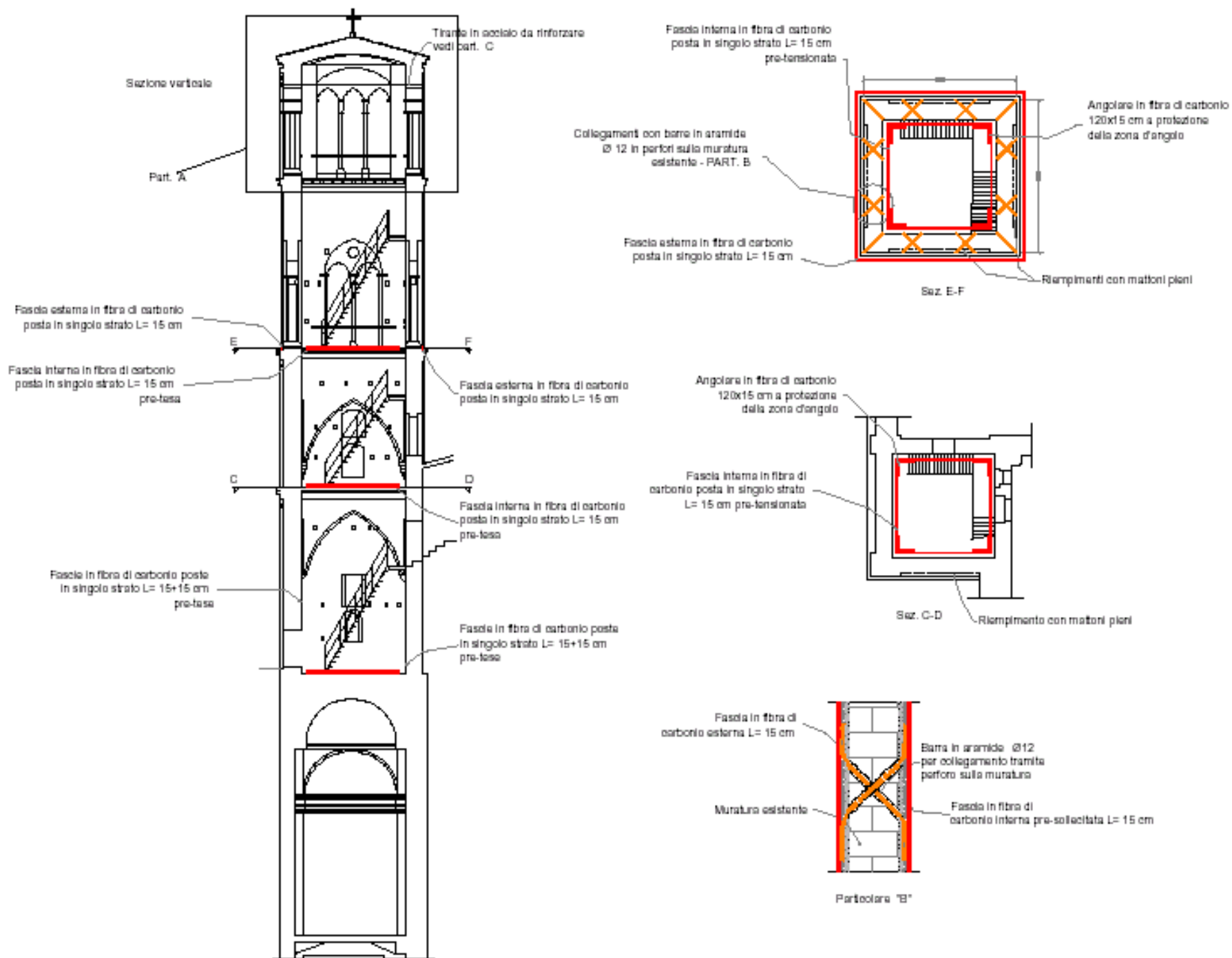


## S. Domenico (Prato)

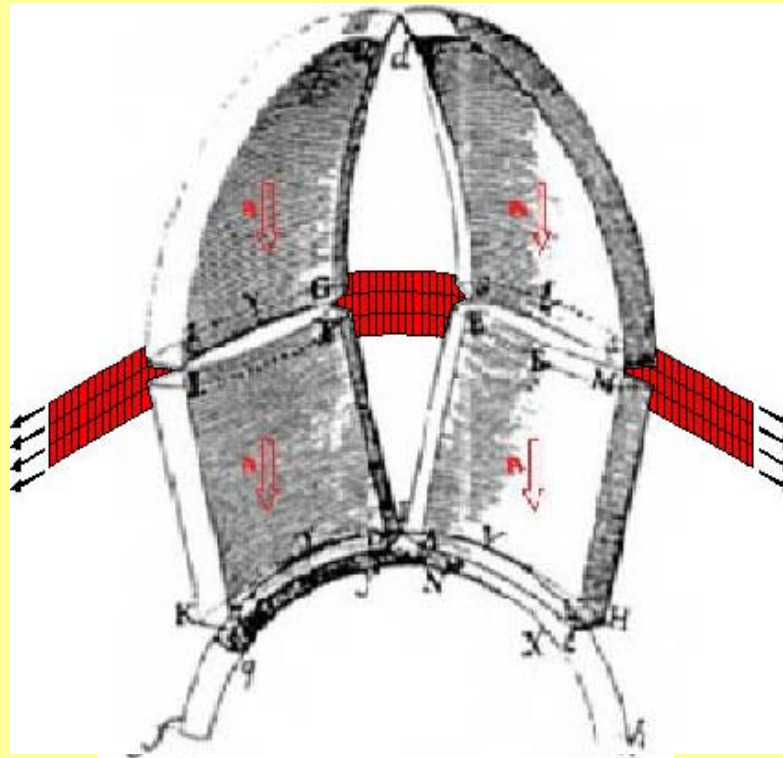


Pretensionamento della cerchiatura esterna

# COMPOSITI E MURATURE

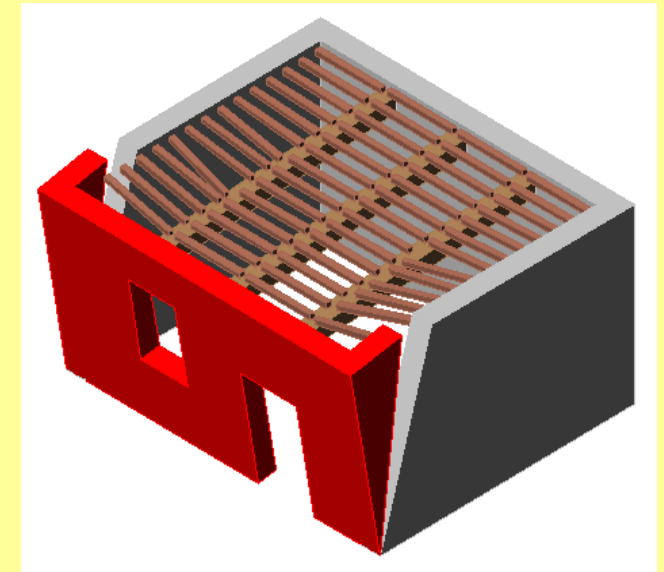
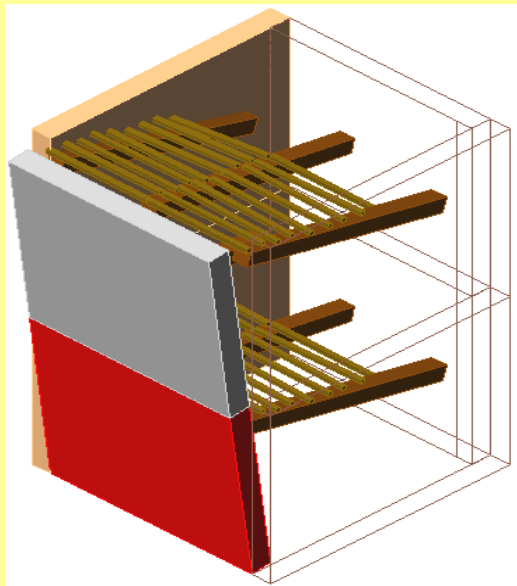
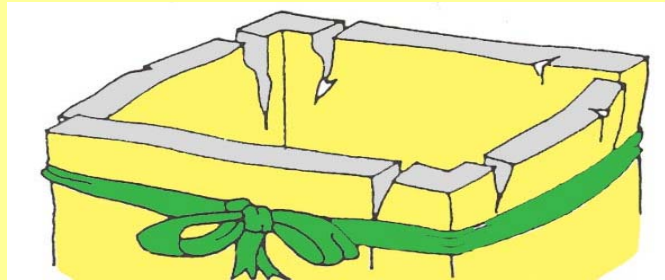


## Cerchiatura di cupole

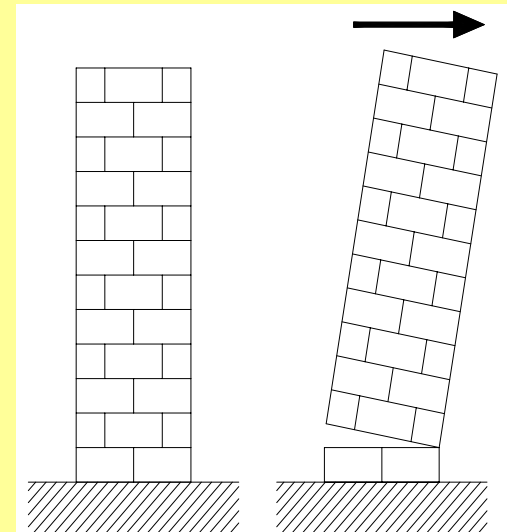
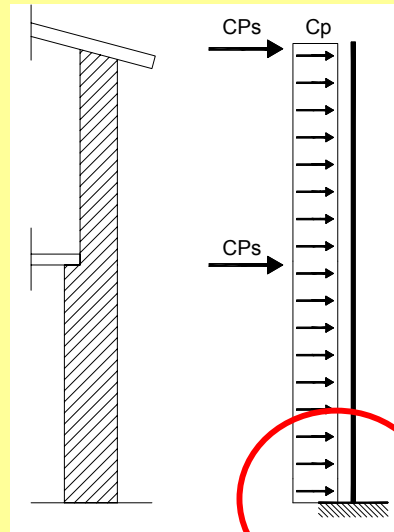
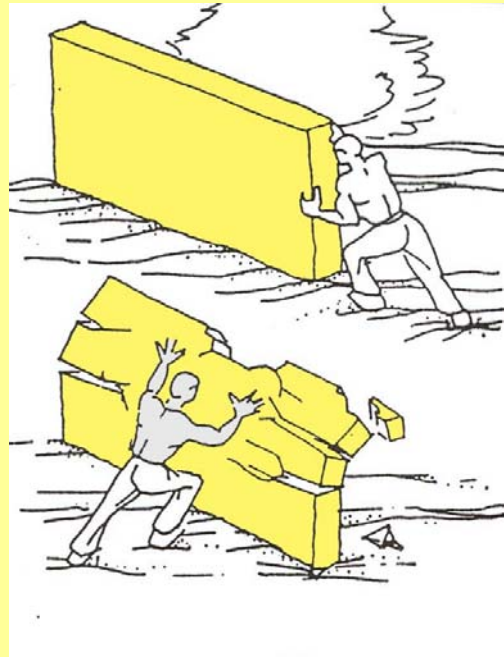


Meccanismo di collasso ipotizzato dal Poleni per una cupola in muratura: l'intervento che ne consegue è una cerchiatura in FRP capace di impedire il distacco tra i vari elementi.

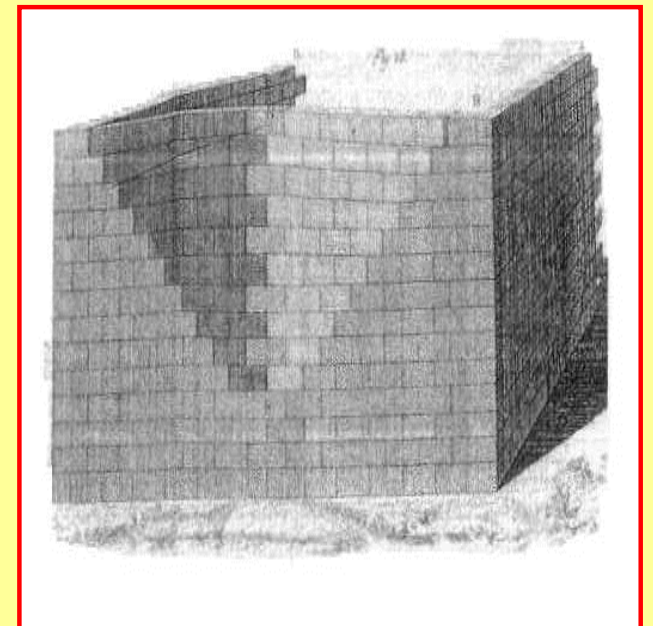
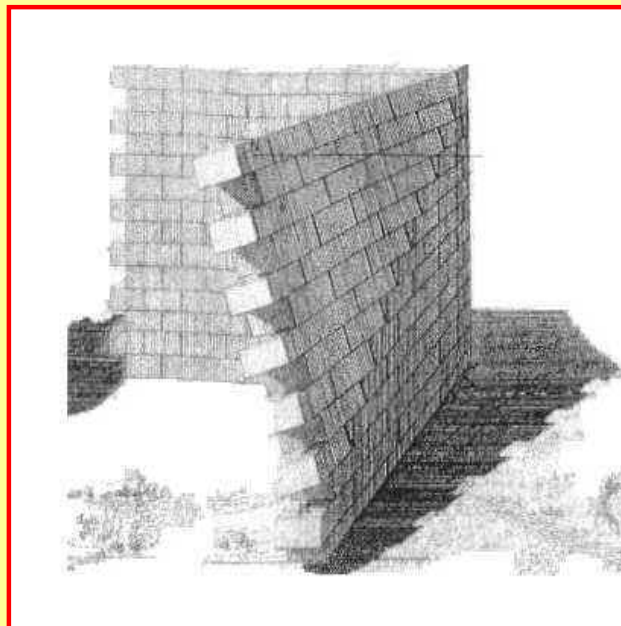
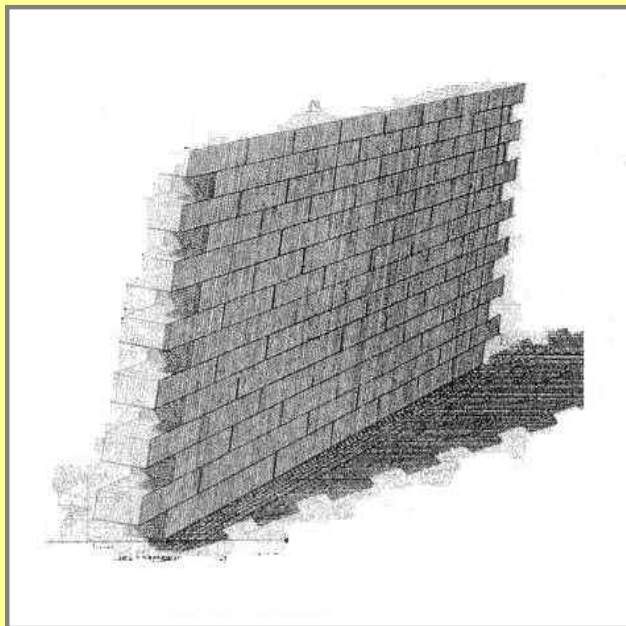
# Cerchiatura di edifici



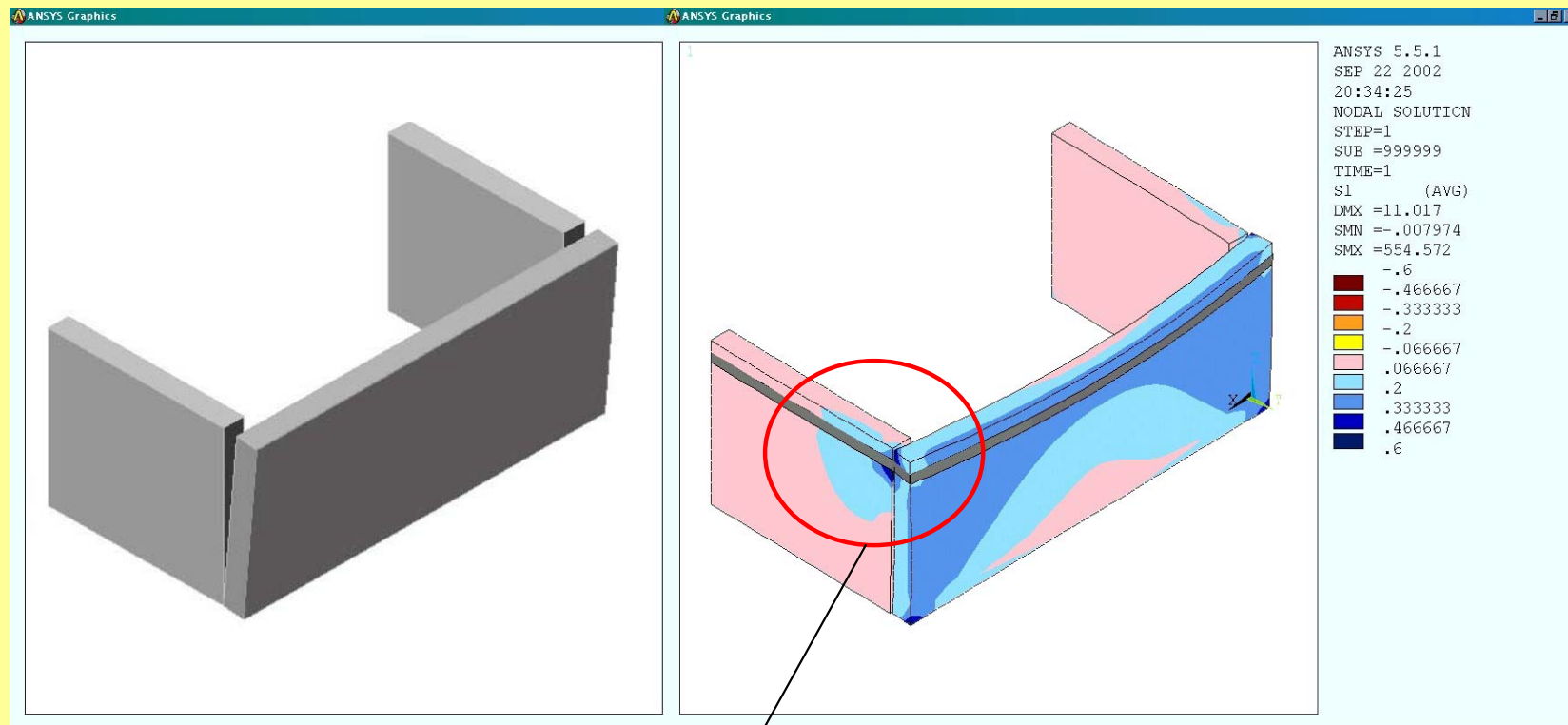
# COMPOSITI E MURATURE



Ricordarsi di verificare ...



## Nastro in FRP: catena e rinforzo flessionale



Notare differenza con catena/capochiave

## Dimensionamento dell'intervento

### MOMENTO STABILIZZANTE

$$M_s = \frac{1}{2}Pb + Fh$$

### MOMENTO RIBALTANTE

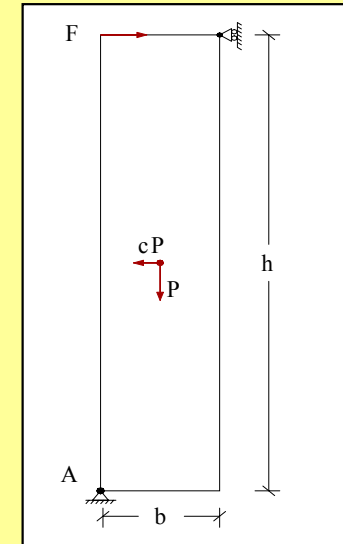
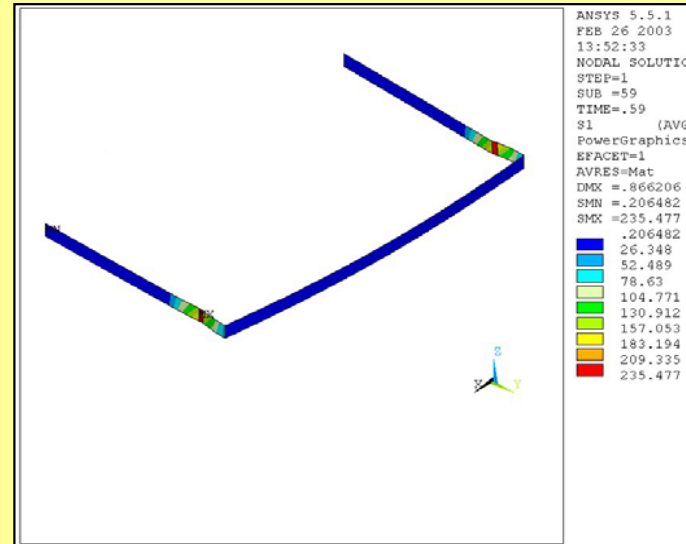
$$M_r = \frac{1}{2}cPh$$

### EQUILIBRIO

$$M_s = M_r$$

### FORZA

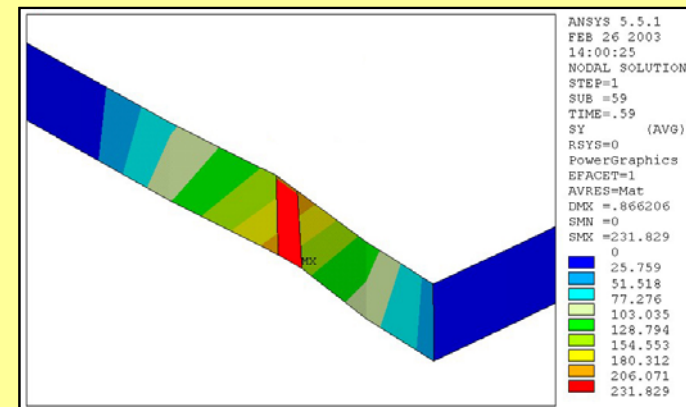
$$F = \frac{cPh - Pb}{2h}$$



### DETERMINAZIONE DELLA LUNGHEZZA D'ANCORAGGIO

UNA RELAZIONE SUFFICIENTEMENTE ATTENDIBILE, IN QUANTO COMPATIBILE CON I RISULTATI EMERSI DALLA MODELLAZIONE NUMERICA, E' LA SEGUENTE:

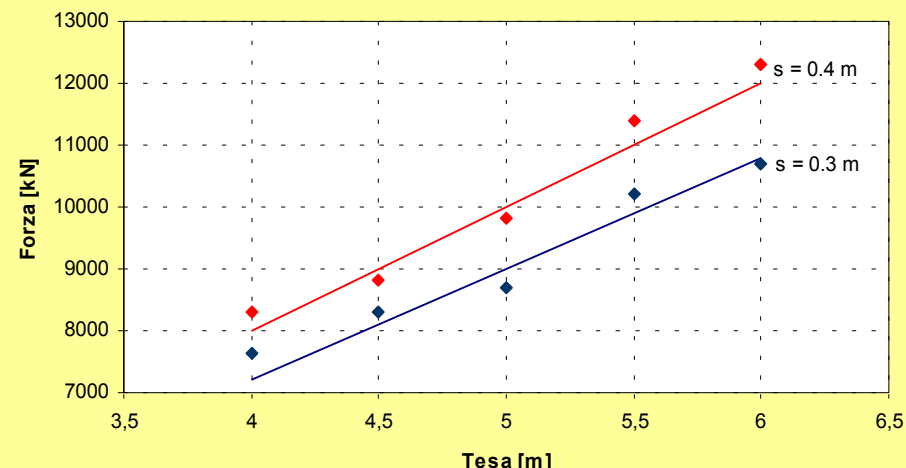
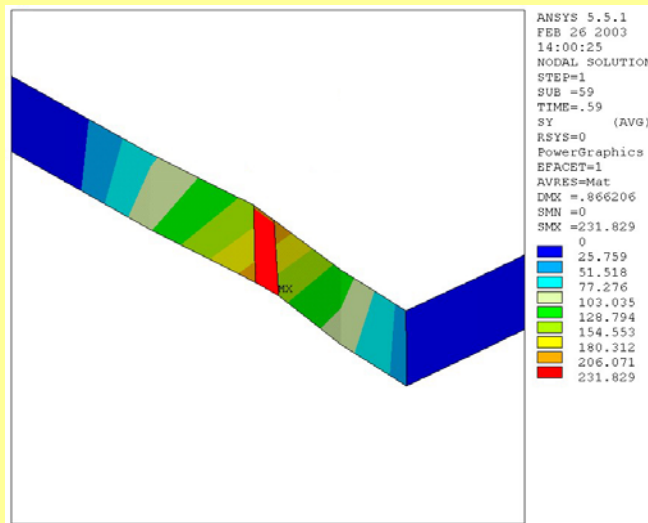
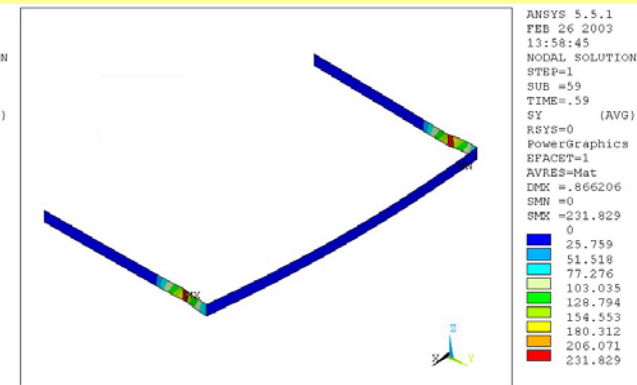
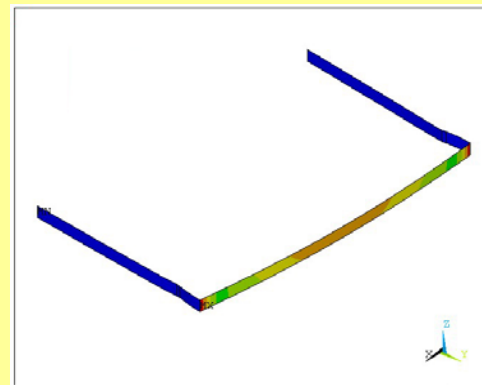
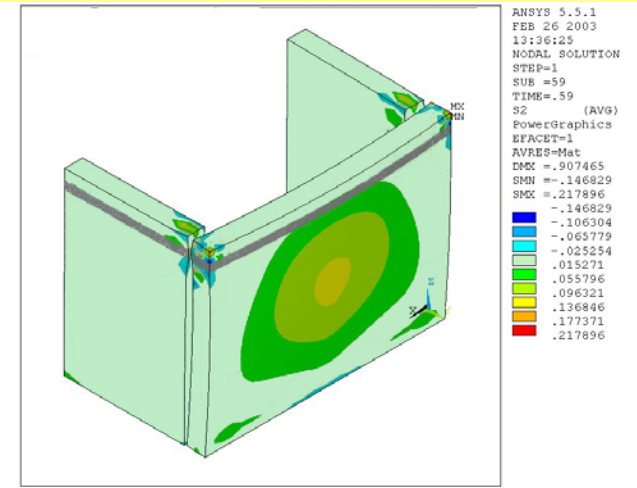
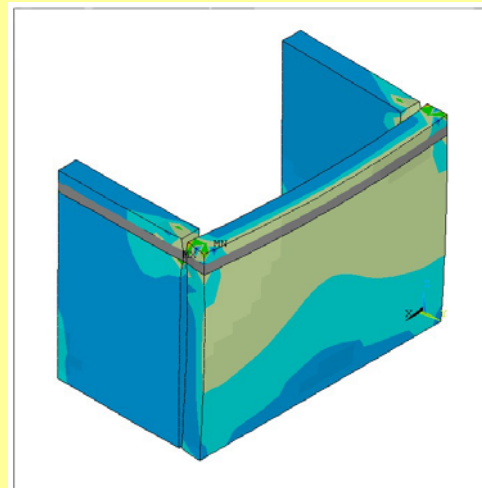
$$L_{ancoraggio} = \beta \left( s + \frac{F}{2\tau_a h} \right)$$



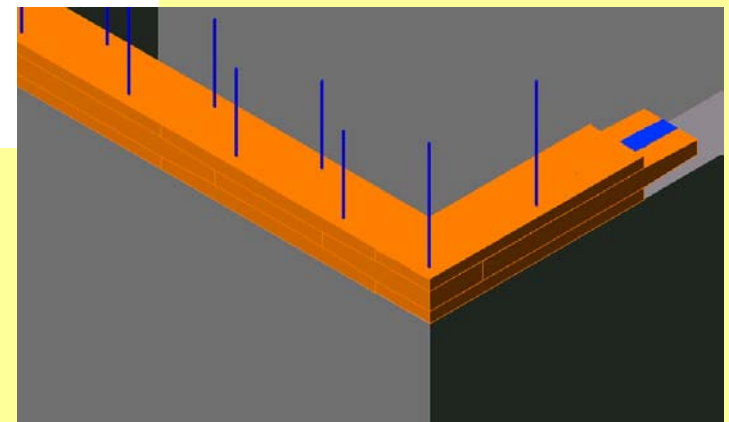
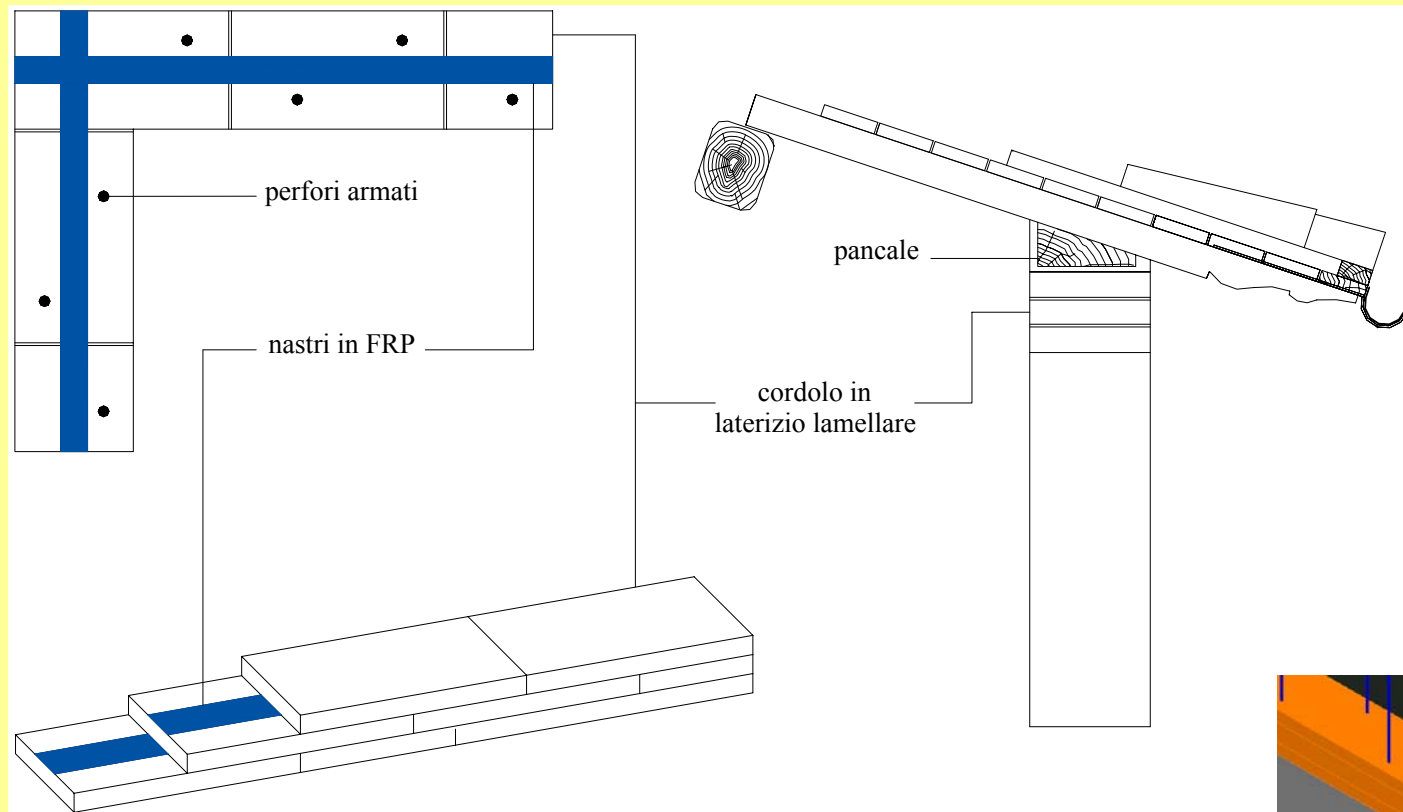


## Verifica del metodo

$$F = \frac{cPh - Pb}{2h}$$



# Cordolo in laterizio armato con FRP

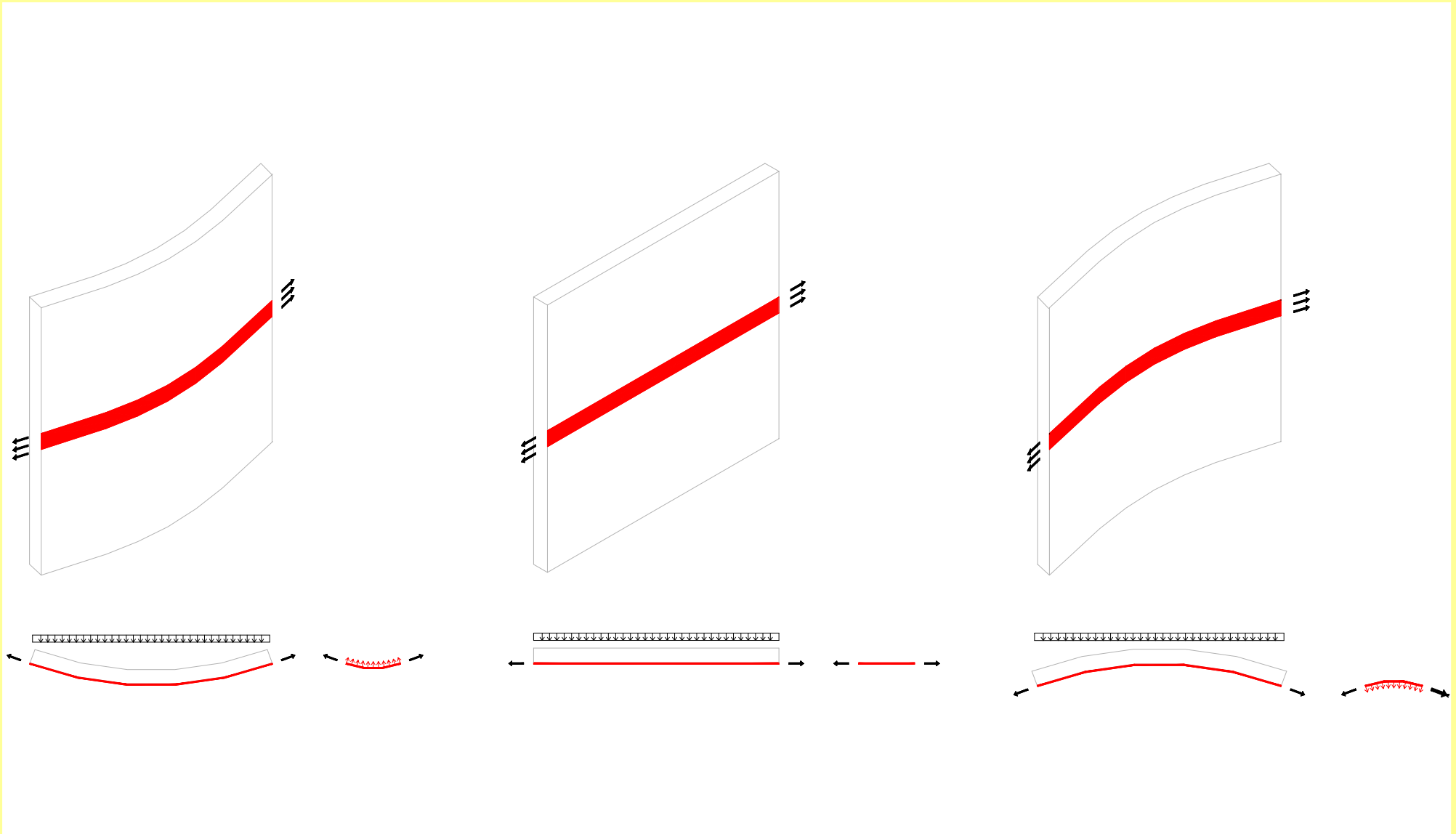


## Prima esperienza: Collelungo (Foligno)



Progettista Ing. A. Giannantoni; Impresa A. Fagotti Laterizi: FBM; Fibre e resina: Kimia

# Forma della cinturazione



**Meccanismi che interessano i pannelli murari:  
dimensionamento dell'intervento con FRP**

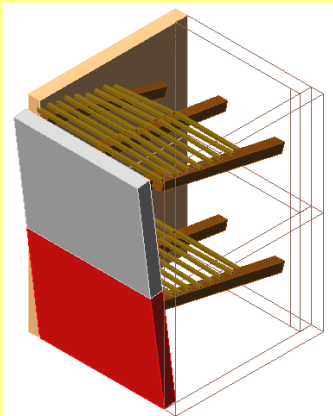
# COMPOSITI E MURATURE

COLLASSO

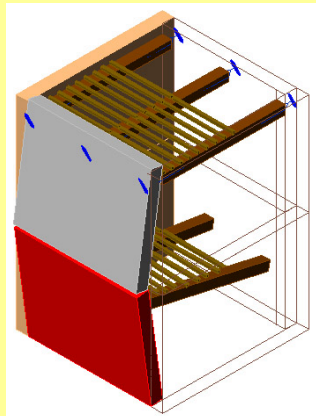
DI

MECCANISMI

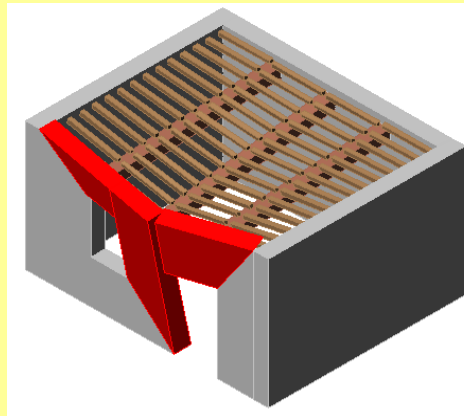
PRINCIPALI



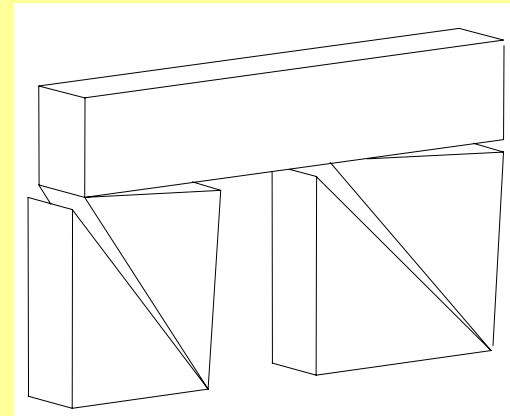
Ribaltamento  
semplice



Flessione  
verticale

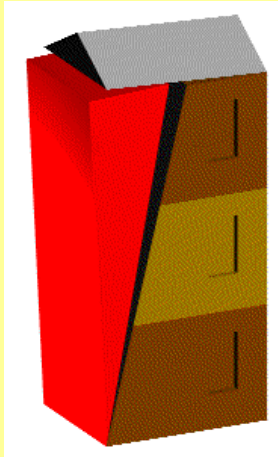
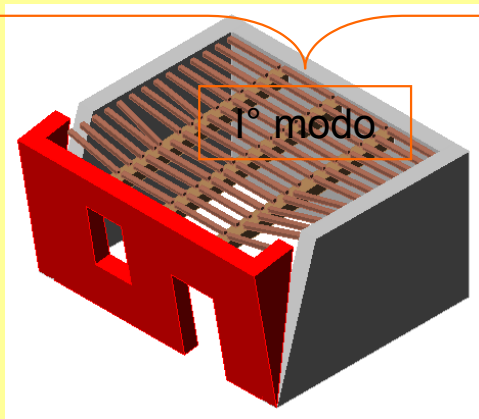


Flessione  
orizzontale

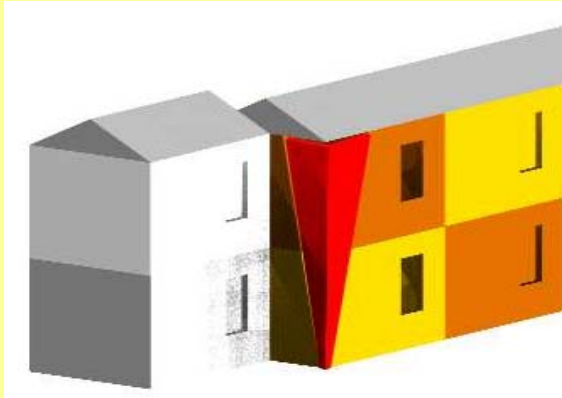
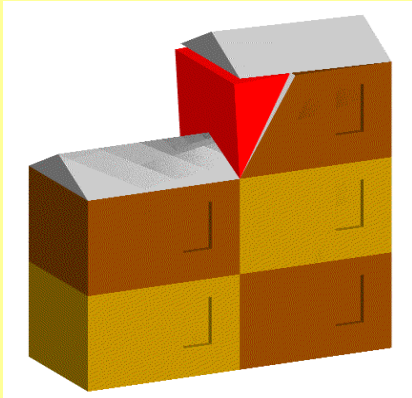
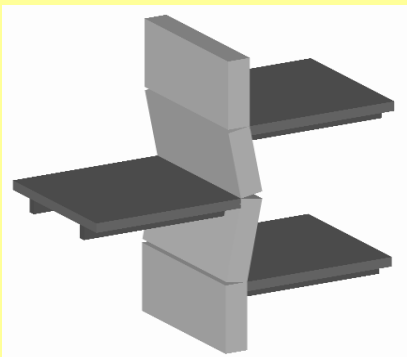


II° modo

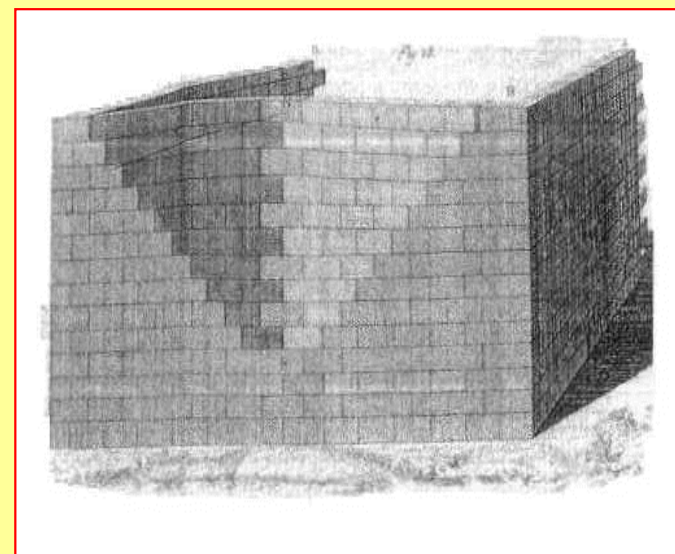
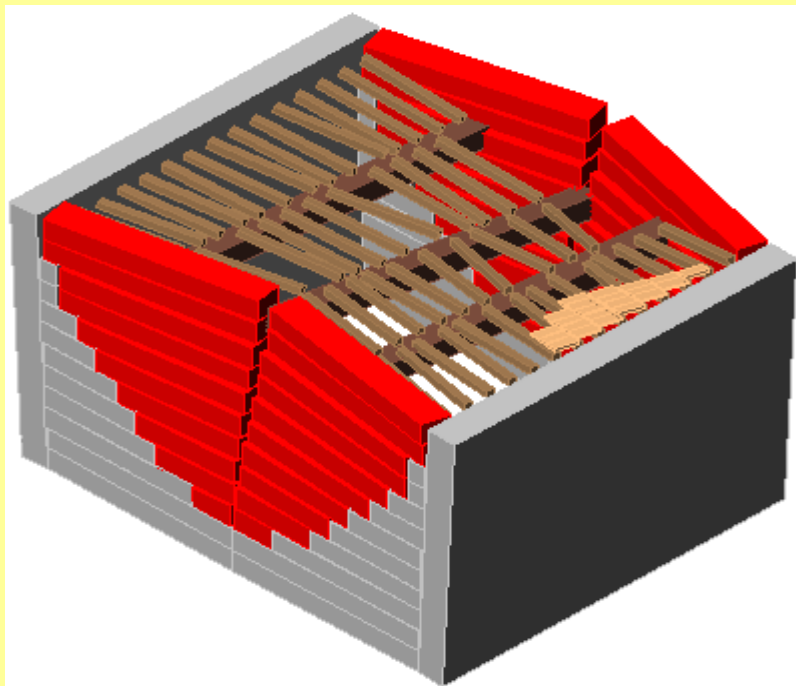
Meccanismi  
"misti"



Condizioni  
al contesto



## Flessione orizzontale



## Dimensionamento dell'intervento: determinazione della forza agente sul nastro

### MOMENTO STABILIZZANTE

$$M_s = S s$$

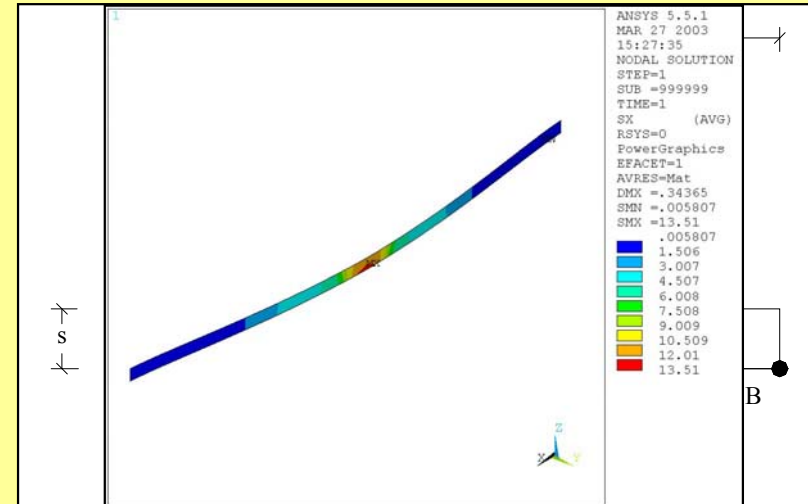
### MOMENTO RIBALTANTE

$$M_r = d \left[ \frac{1}{L} \sum F_i (L - L_i) + \frac{p}{2} (L - d) \right]$$

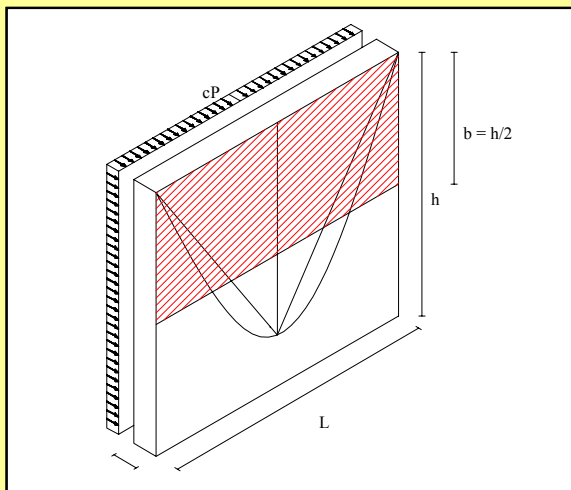
### EQUILIBRIO

### FORZA AMMISSIBILE

$$M_s = M_r \quad S = \frac{d}{s} \left[ \frac{1}{L} \sum F_i (L - L_i) + \frac{p}{2} (L - d) \right]$$



## DETERMINAZIONE DELLA PORZIONE DI MURATURA COINVOLTA DAL CINEMATISMO



### GEOMETRIA DEL CUNEO DI DISTACCO

**PROFILO PARABOLICO**

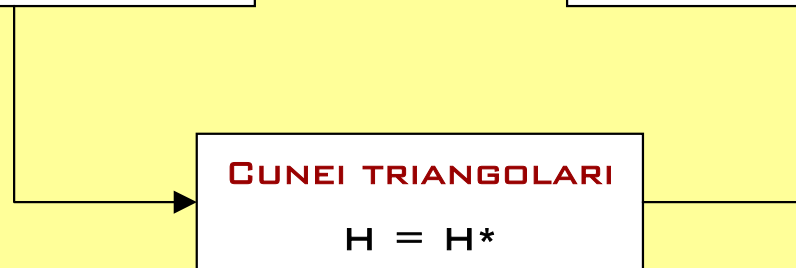
$$H = H^*$$

**FASCIA EQUIVALENTE**

$$B = H/2$$

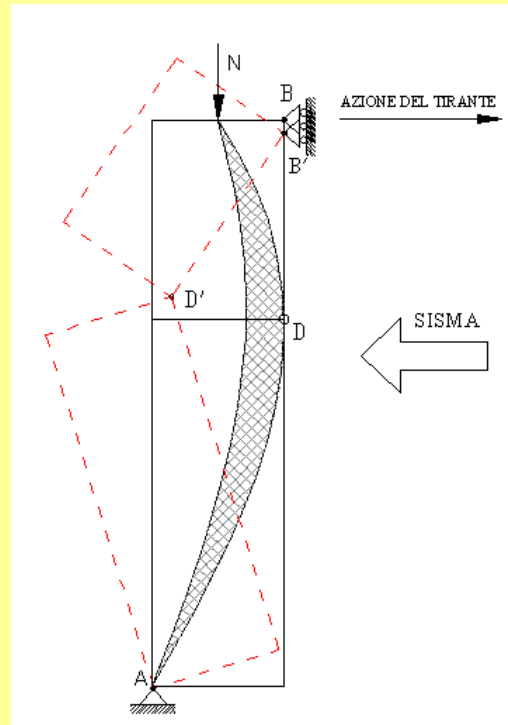
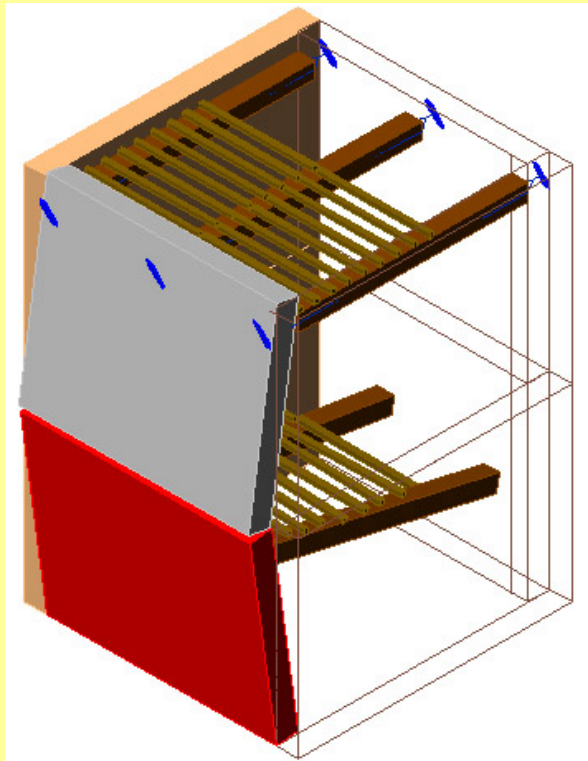
**CUNEI TRIANGOLARI**

$$H = H^*$$





## Flessione verticale



## DIMENSIONAMENTO DELL'INTERVENTO

### MOMENTO STABILIZZANTE

$$M_s = SB + (P_1 + P_2 + N) \frac{B}{2}$$

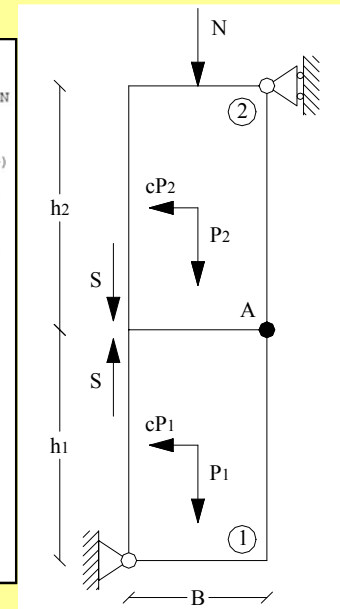
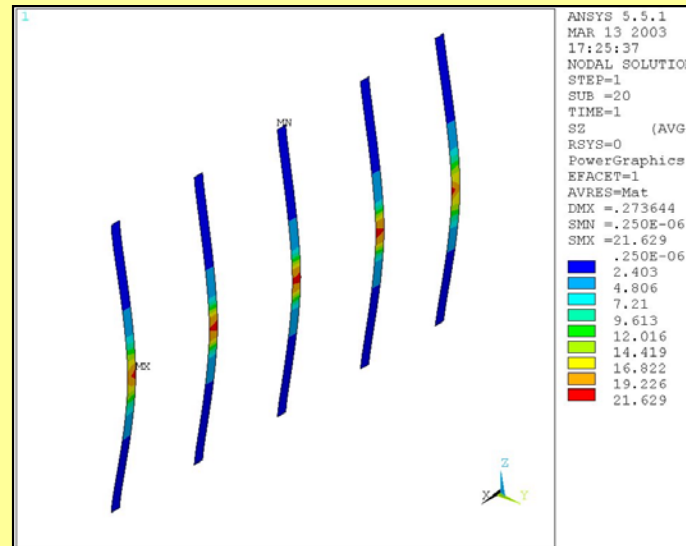
### MOMENTO RIBALTANTE

$$M_r = c \frac{Ph_1h_2}{2hB}$$

### EQUILIBRIO

### FORZA

$$M_s = M_r \quad S = c \frac{Ph_1h_2}{2hB} - \frac{P+N}{2}$$



## DETERMINAZIONE DELL'ALTEZZA DELLA CERNIERA CILINDRICA

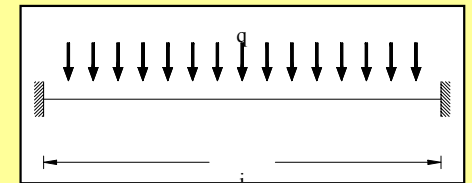
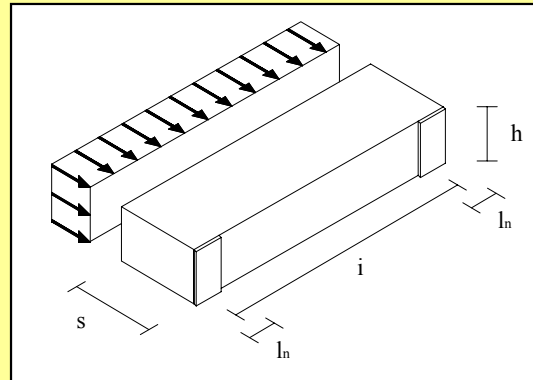
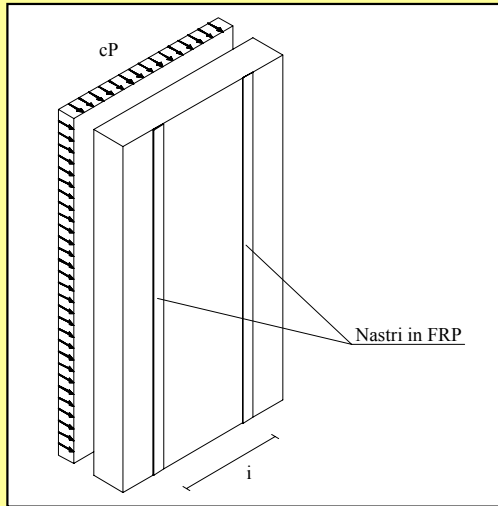
SI INTRODUCE UN COEFFICIENTE X ARBITRARIO TALE CHE:

$$h_1 = \frac{x-1}{x} h \quad h_2 = \frac{1}{x} h \quad \longrightarrow \quad c(x) = \frac{bx}{(x-1)h} \left[ 2 + \frac{N}{P}(x+1) \right] \quad \longrightarrow \quad \frac{\delta c}{\delta x} = 0$$

**ALTEZZA CERNIERA:**

$$h_1 = \frac{h \sqrt{2 \frac{P+N}{N}}}{1 + \sqrt{2 \frac{P+N}{N}}} \quad h_2 = \frac{h}{1 + \sqrt{2 \frac{P+N}{N}}}$$

## Flessione verticale: determinazione dell'interasse



### ANALISI TENSIONALE

#### MOMENTO FLETTENTE

$$M = \frac{1}{24} q i^2$$

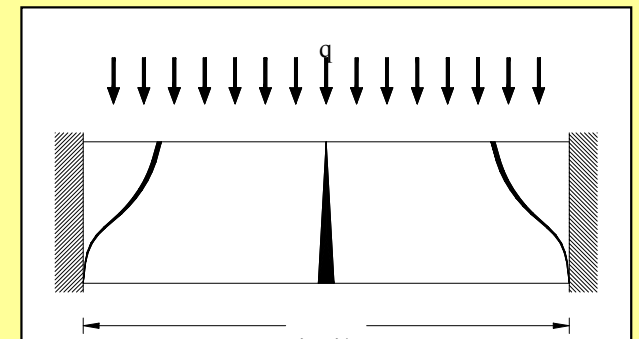
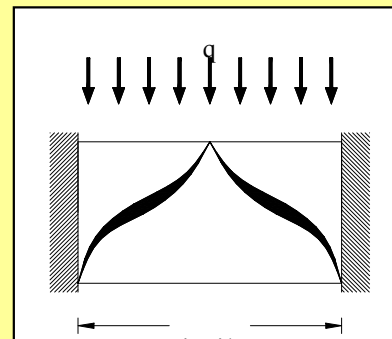
#### MODULO DI RESISTENZA

$$W = \frac{h s^2}{6} = \frac{s^2}{6}$$

### FINALITA'

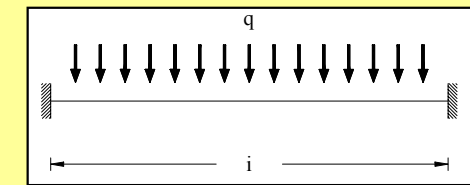
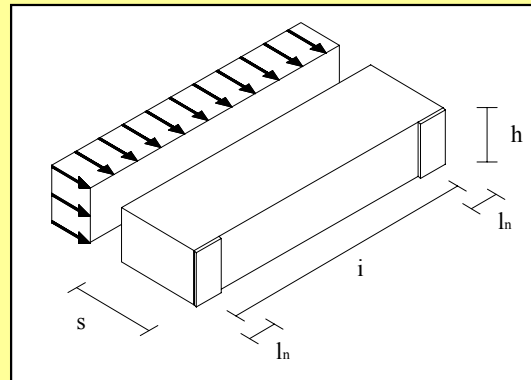
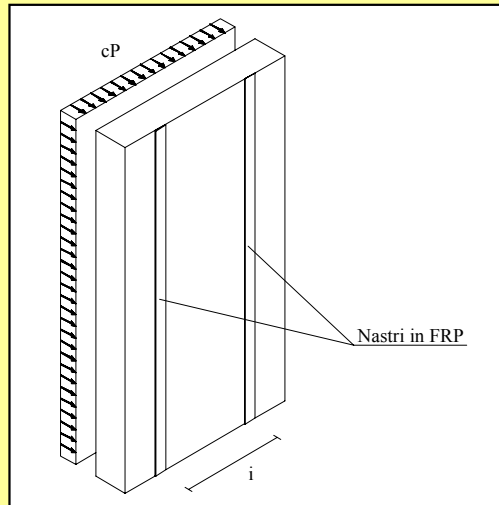
### INTERASSE

$$\sigma \leq \sigma_m \quad \longrightarrow \quad i \leq 2 \sqrt{\frac{\sigma_m}{q}} \quad s = i^* \quad \longrightarrow$$



# COMPOSITI E MURATURE

## DETERMINAZIONE DELL'INTERASSE



## ANALISI DEFORMATIVA

### SPOSTAMENTO RISULTANTE

$$\eta = \eta_F + \eta_V$$



### COMPONENTE FLETTENTE

$$\eta_F = \frac{qi}{32E} \left( \frac{i}{s} \right)^3$$

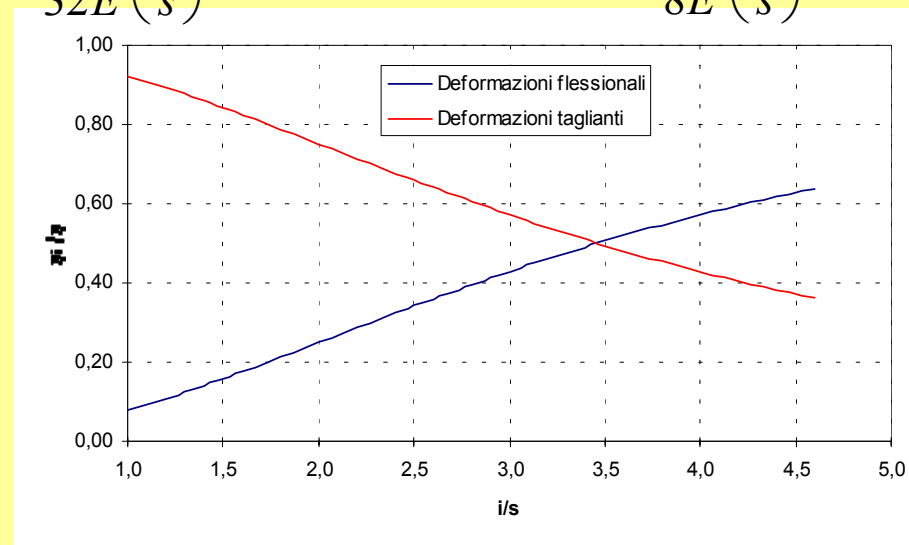
### COMPONENTE TAGLIANTE

$$\eta_V = \frac{3qi}{8E} \left( \frac{i}{s} \right)$$

### FINALITA'

### INTERASSE

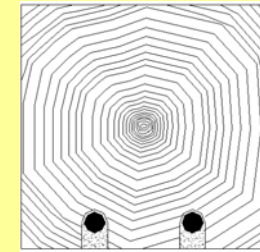
$$\eta_F \leq \eta_V \quad \longrightarrow \quad i \leq 3.5s = i^*$$



## **Rinforzo di solai lignei**

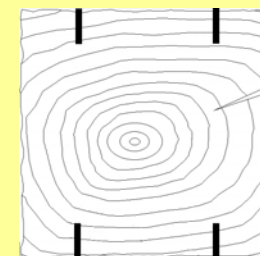
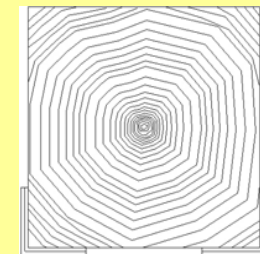
## Interventi con nastri

Presentano il grande vantaggio di facilità di applicazione e di effetto fasciante per gli eventuali difetti presenti all'intradosso dell'elemento ligneo.



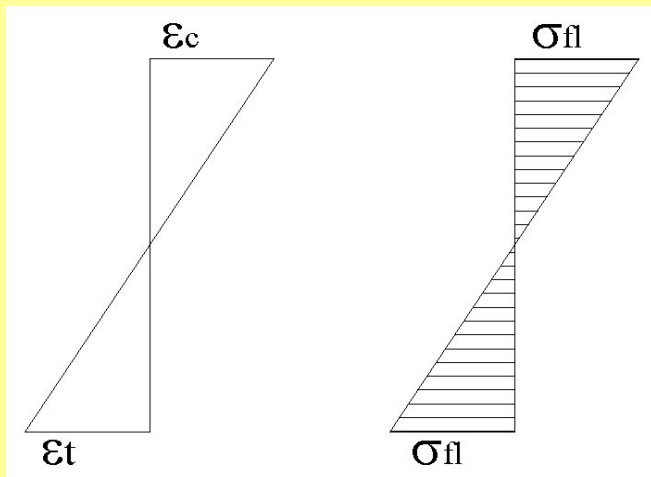
## Interventi con barre e lamelle

Data la capacità di resistere a compressione di questi elementi l'intervento fornisce contributi su entrambi i lembi dell'elemento da rinforzare.



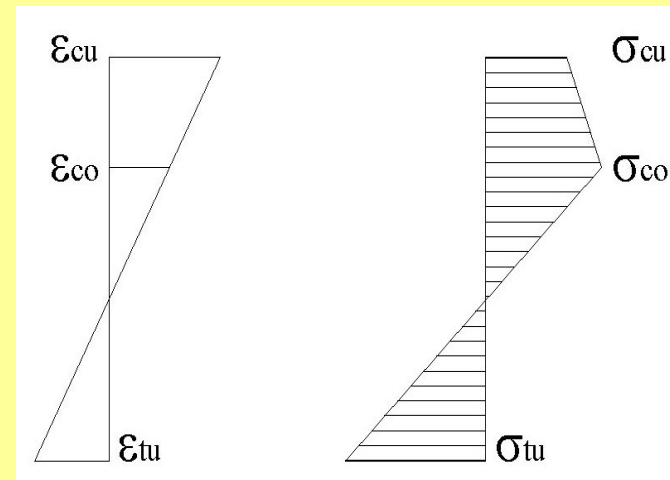
## Calcolo in campo lineare

- Metodo alle tensioni ammissibili
- Sezione interamente reagente
- Legno: comportamento elasto fragile di tipo lineare.
- FRP: elasto fragile di tipo lineare.
- Nessun controllo sullo stato deformativo e sulle modalità di collasso dell'elemento



## Calcolo in campo non lineare

- Metodo alle stato limite ultimo
- Sezione interamente reagente
- Legno: elasto-plastico (legame di Bazan-Buchanan).
- FRP: elasto fragile di tipo lineare.
- Controllo sullo stato deformativo e sulla possibile modalità di collasso



## Dimensionamento in campo elastico lineare (tensioni ammissibili)

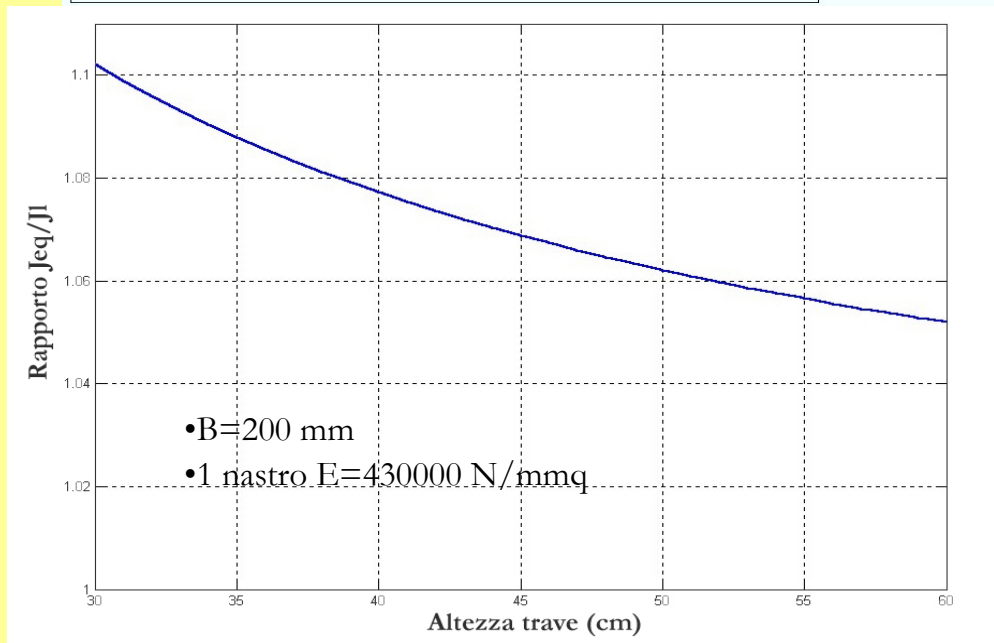
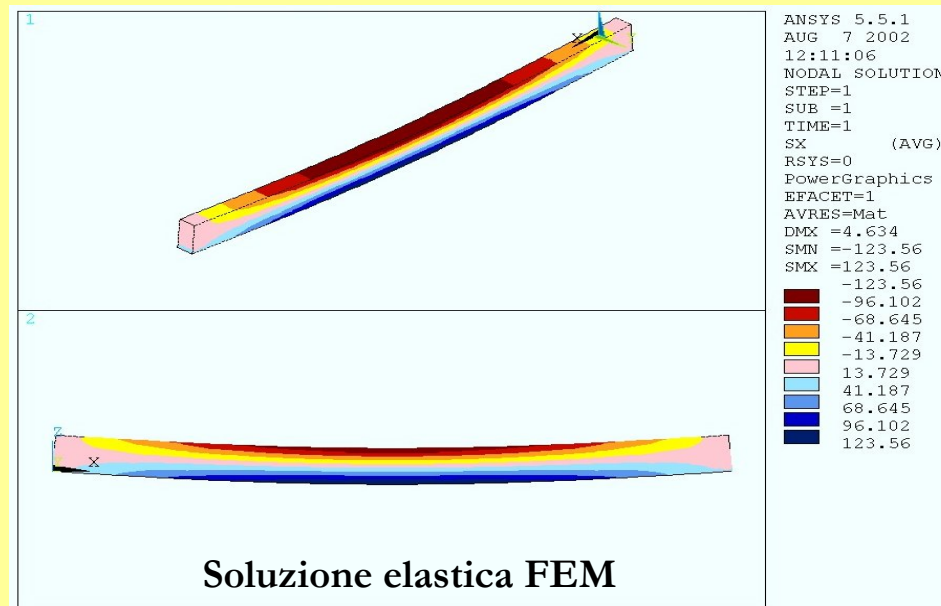
Il metodo si basa sulla tecnica dell'omogenizzazione della sezione di legno-FRP.

$$J_{eq} = J_{legno} + J_{frp}$$

$$\sigma_{max} = \frac{M}{C \cdot J_{eq}} y_{max} \quad A_{eq} = A_{legno} + nA_{frp}$$

Conduce ad una valutazione dell'incremento di resistenza e rigidità a seguito dell'applicazione del composito di modesta entità (10-20%).

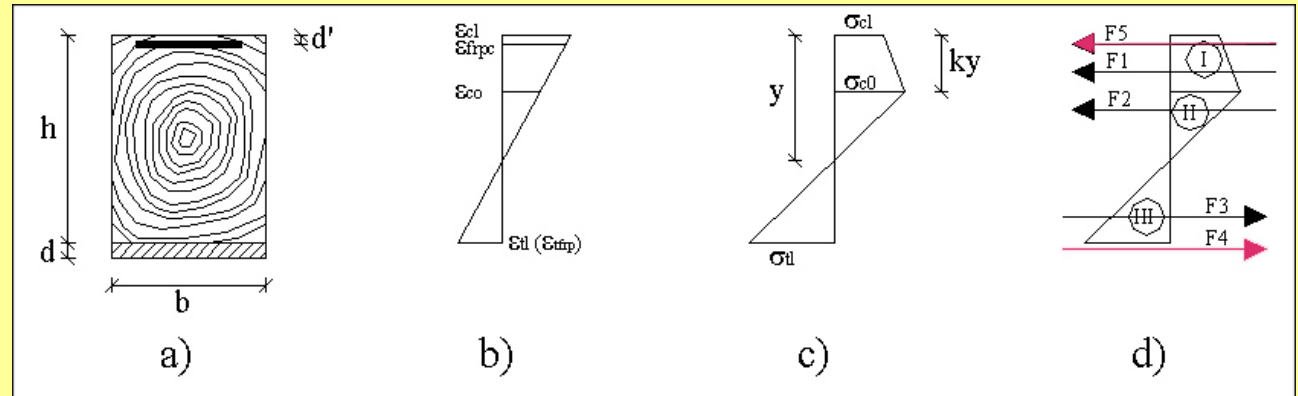
(non può tenere conto della possibile plasticizzazione al lembo compresso del materiale)





## Dimensionamento in campo non lineare (S.L.U.)

Tale metodo si basa sull'analisi in condizioni di rottura dell'elemento ligneo. Attraverso l'utilizzo delle equazioni di legame, congruenza ed equilibrio sulla sezione si determina la posizione dell'asse neutro e quindi il momento reattivo ultimo per la determinata modalità di collasso.



### Equilibrio

$$F_I + F_{II} + F_V = F_{III} + F_{IV}$$

### Congruenza

$$\frac{\varepsilon_{cl}}{y} = \frac{\varepsilon_{sl}}{h-y} = \frac{\varepsilon_{c0}}{y(1-k)} = \frac{\varepsilon_{frpt}}{h-y} = \frac{\varepsilon_{frpc}}{y-d'}$$

### Legame costitutivo

$$\begin{aligned} \sigma_{cl} &= E_l \cdot \varepsilon_{cl} & \text{se } \varepsilon_{cl} < \varepsilon_{c0} \\ \sigma_{cl} &= \sigma_{c0} - m \cdot (\varepsilon_{cl} - \varepsilon_{c0}) & \text{se } \varepsilon_{cl} > \varepsilon_{c0} \\ \sigma_{sl} &= E_l \cdot \varepsilon_{sl} \end{aligned}$$

### Eq. Asse neutro

$$\sigma_{c0} \cdot y^2 \cdot (1 + \alpha - \alpha \delta) - E_{lt} \cdot \varepsilon_{c0} \cdot (h-y)^2 + 2 \cdot \rho_{frpc} \cdot E_{frpc} \cdot b \cdot h \cdot \varepsilon_{cu} \cdot (y-d) - 2 \cdot \rho_{frpt} \cdot E_{frpt} \cdot h \cdot \varepsilon_{cu} \cdot (h-y) = 0$$

### Momento ultimo

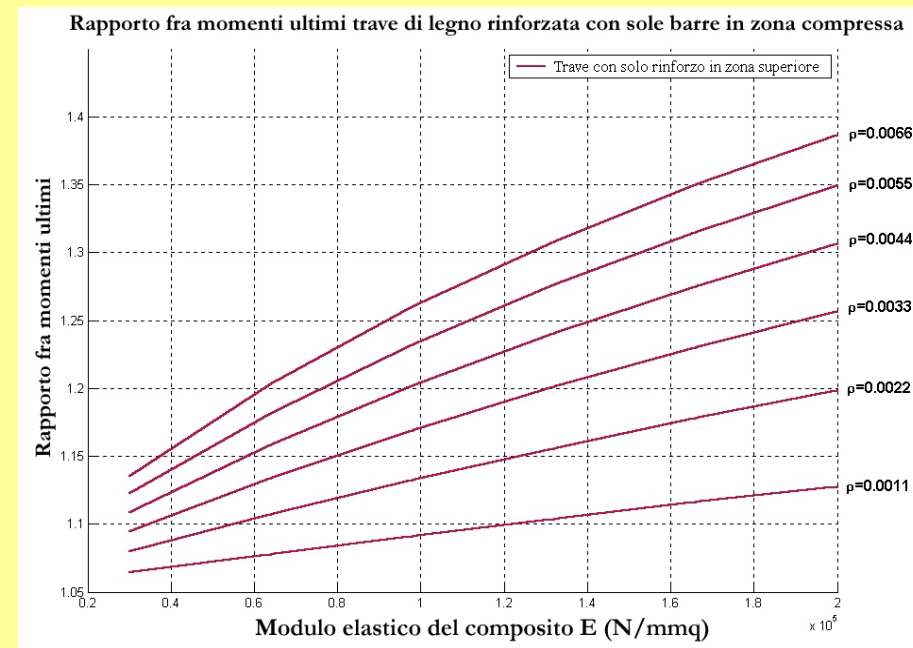
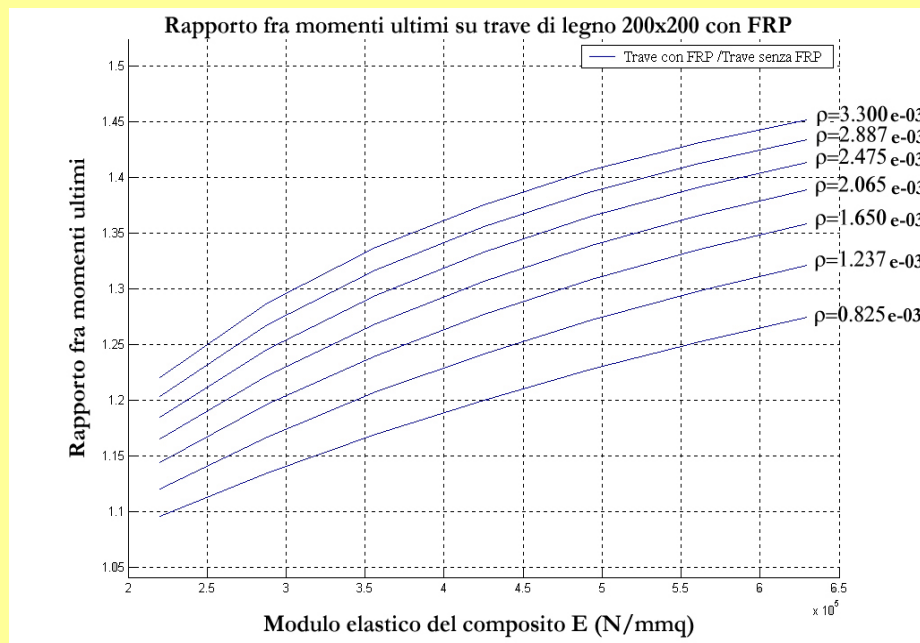
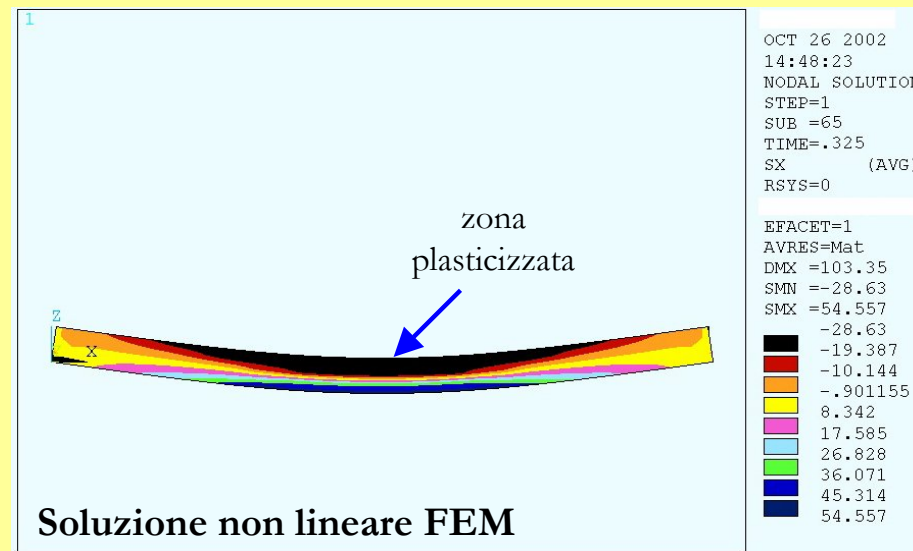
$$Mu = F_I \cdot b_l + \frac{2}{3} \cdot F_{II} \cdot y \cdot (1-k) + \frac{2}{3} \cdot F_{III} \cdot (h-y) + F_{IV} \cdot (h-y) + F_V \cdot (y-d')$$

## Dimensionamento in campo non lineare (S.L.U.)

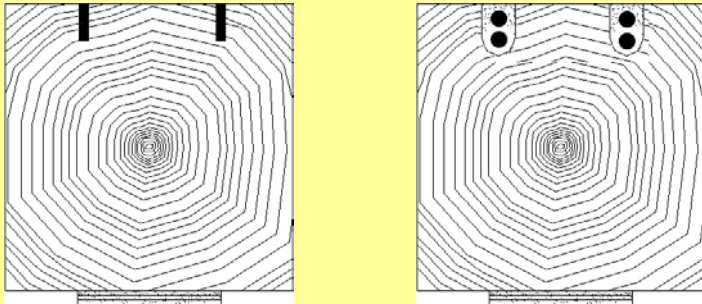
L'applicazione del calcolo a rottura consente di spiegare gli incrementi di rigidezza e resistenza trovati sperimentalmente. La zona plasticizzata infatti, pur contribuendo all'equilibrio non fornisce più il contributo in termini di rigidezza.

L'apporto del composito diviene quindi di fondamentale importanza.

Tale procedura si applica bene a legnami di discreta qualità tali da presentare comportamento non lineare in zona compressa

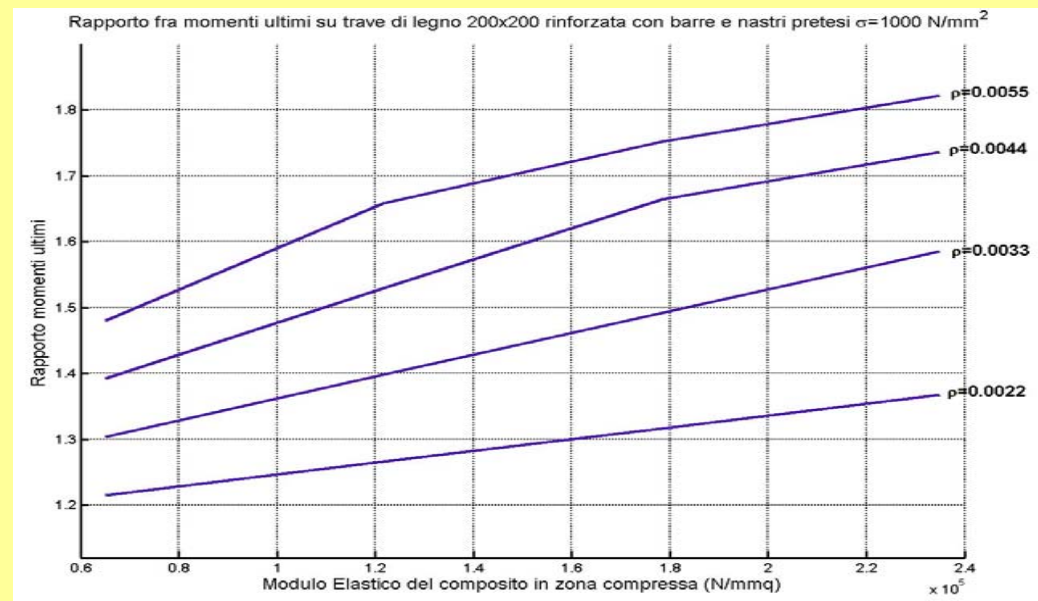
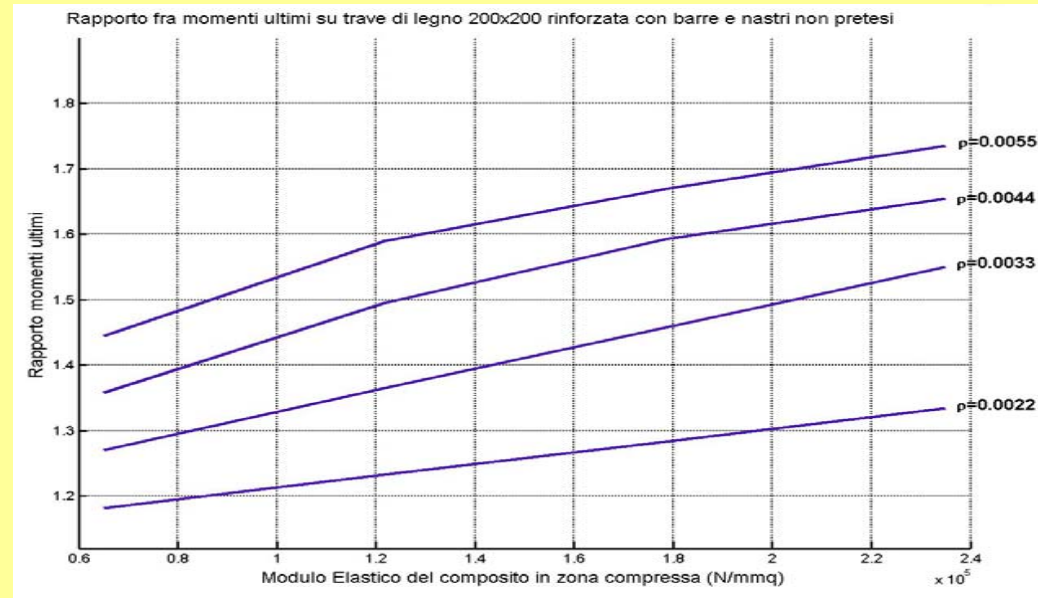


## Dimensionamento in campo non lineare (S.L.U.)



E' possibile utilizzare il calcolo non lineare per dare una stima sull'efficacia degli interventi di rinforzo con barre al lembo superiore e nastri, pretesi e non, al lembo inferiore.

Nel caso in cui ci si trovi di fronte ad un legno di qualità tale da esibire un comportamento non lineare in compressione è possibile ottenere significativi incrementi sul momento ultimo rispetto alla trave non rinforzata.



# Prove sperimentali



## Campagna sperimentale I

La prima campagna sperimentale (1995) ha riguardato lo studio dell'efficacia di varie configurazioni di rinforzo basate sull'utilizzo di bandelle su elementi lignei inflessi (120x180x3700 mm).

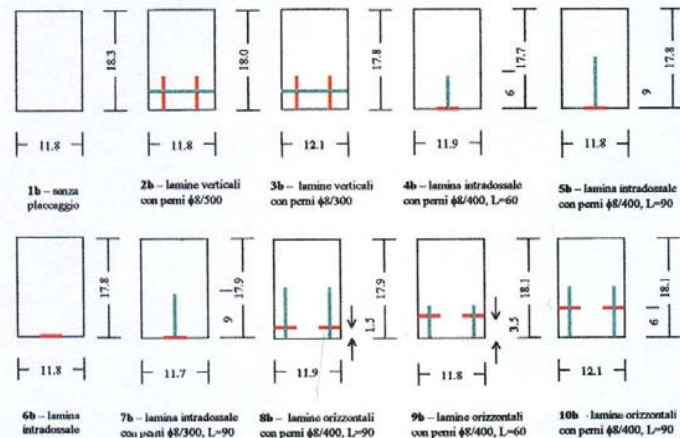
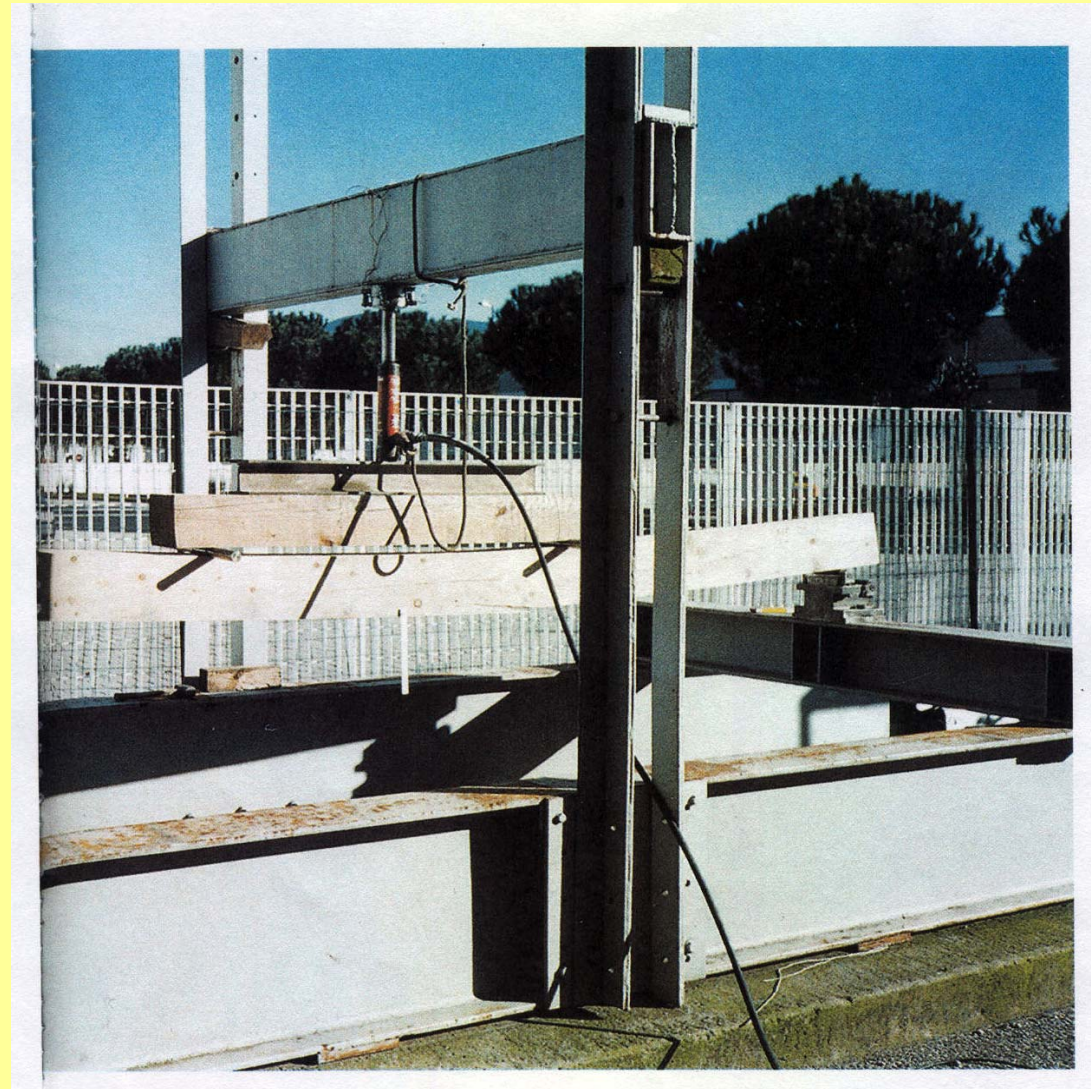
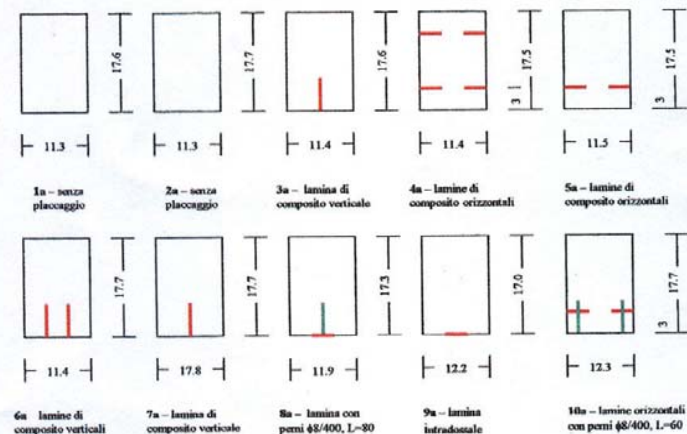


FIGURA 1 (SOPRA). SCHEMA GEOMETRICO DELLE SEZIONI DELLE TRAVI ESAMINATE NELLA PRIMA FASE DI SPERIMENTAZIONE. COME SI EVINCE DALLO STESSO SCHEMA LE MODALITÀ DI PLACCGGIO CONSIDERATE SONO SIA DI TIPO INTERNO, CHE ESTERNO. FIGURA 2. LE SEZIONI DELLE TRAVI NELLA SECONDA FASE DI SPERIMENTAZIONE. SONO APPLICATE LE STESSO MODALITÀ DI INTERVENTO DELLA PRECEDENTE INDAGINE CON L'AUTO, IN UN MAGGIOR NUMERO DI CASI, DI CONNETTORI IN VETRORESINA



## Campagna sperimentale II

Prove su travetti 100x100x2000 mm  
usualmente utilizzati per la  
realizzazione delle orditure  
secondarie, rinforzati con vari  
tipologie di rinforzo con nastri.



## Campagna sperimentale III

Travi in legno di abete di sezione 200x200x4000 mm.

Sono state analizzate differenti configurazioni di rinforzo con nastri singoli, sovrapposti o di spigolo, con conferimento o meno di controfreccia.

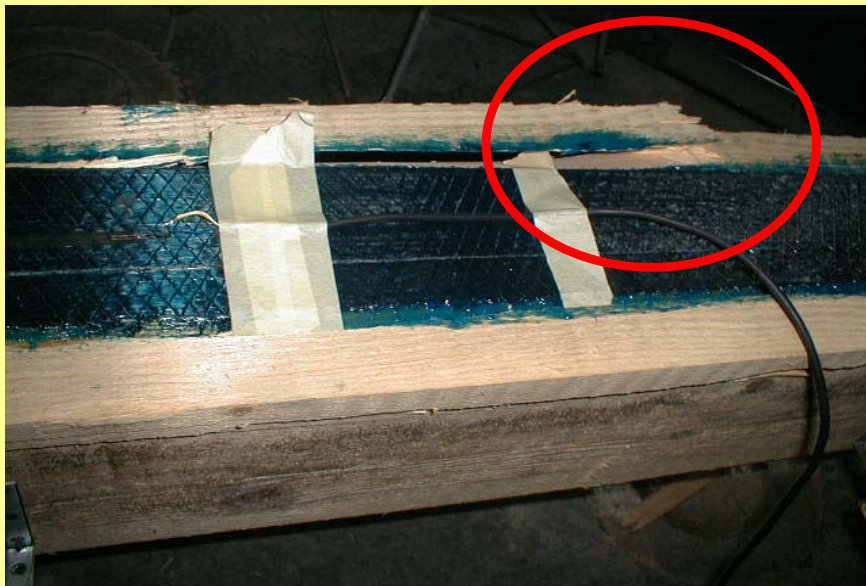
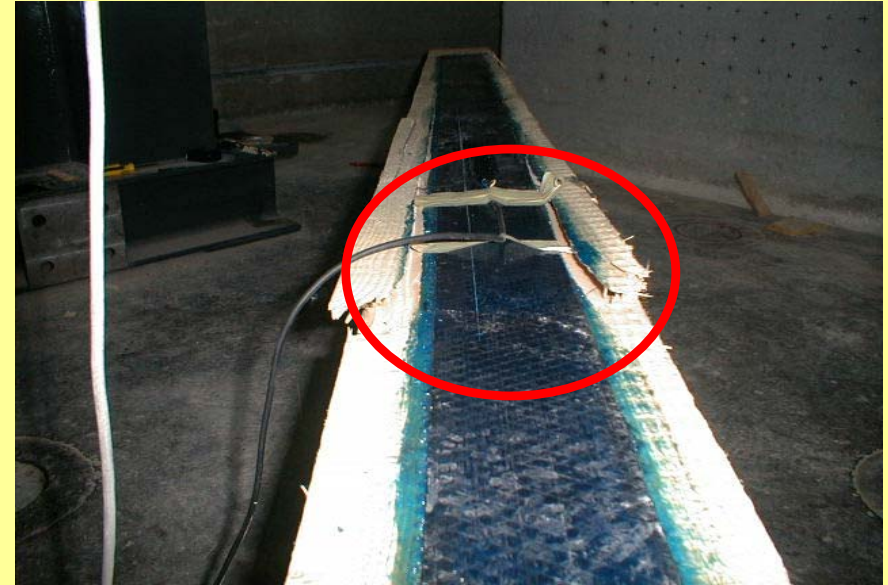
Si è proceduto inoltre allo studio dell'efficacia del rinforzo con una o più barre in zona tesa.



## Modalità di collasso

L'innesco della rottura riguarda soprattutto gli spigoli.

L'azione di confinamento indotta dai nastri in CFRP è in grado di bloccare la propagazione della lesione che comincia dal difetto (nodo, fenditura, etc.)





## Campagna sperimentale IV

Travi in legno di abete di sezione 200x200x4100 mm.

Sono state analizzate differenti configurazioni di rinforzo tramite l'utilizzo combinato di rinforzi in zona tesa e compressa.

Si è proceduto inoltre ad un primo studio sugli effetti della pretensione degli elementi nastro applicati in zona tesa.



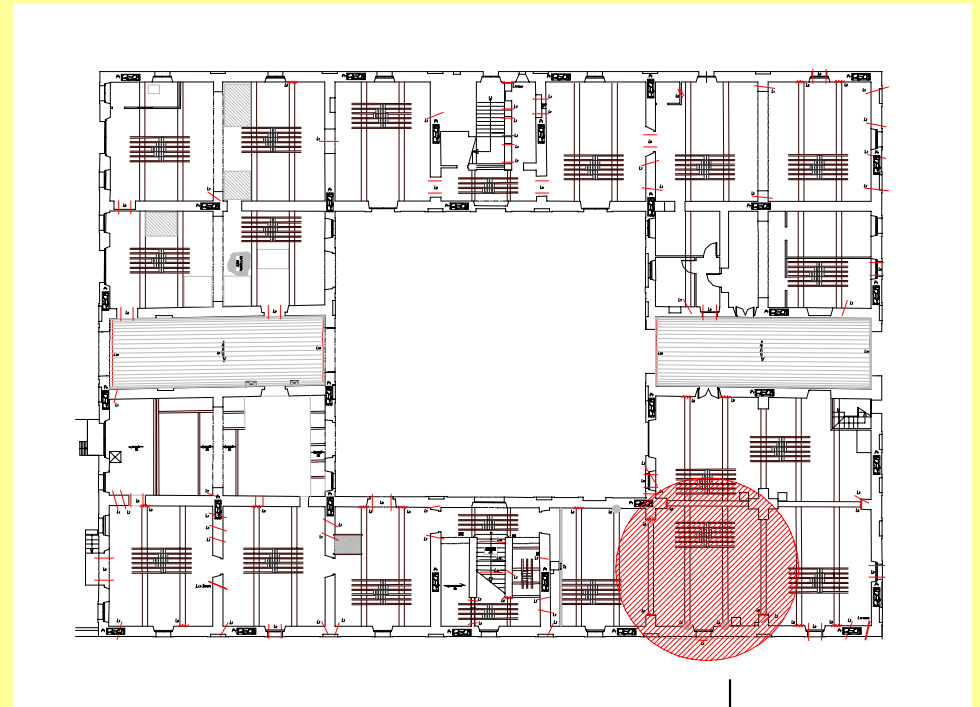
## Prove di sfilamento di barre

Prove per la valutazione dello sfilamento delle barre inserite in elementi in legno di abete e castagno per differenti lunghezze di ancoraggio.





Foto di insieme



AREA OGGETTO DI STUDIO

Pianta primo livello

## Edificio SIAZ (Trevi)

- **Proprietà:** Soc. SIAZ (Società Italiana Approvvigionamenti Zootecnici)
- **Epoca di costruzione:** 1870
- **Ubicazione:** Parrano di Trevis
- **Destinazione d'uso originaria:** magazzino per olive e cereali
- **Destinazione d'uso attuale:** magazzino per cereali



Vista del solaio dall'intradosso

## Esecuzione dell'intervento di rinforzo



Incisione del legno con fresa a lama sottile



Inserimento della lamella

- Fase 1: esecuzione delle linee di incasso per le lamelle in C.F.R.P.;
- Fase 2: Saturazione dei vuoti con pasta di resina epossidica;
- Fase 3: Inserimento della lamella in C.F.R.P.;
- Fase 4: Inserimento di un reticolo di Bragg in mezzeria per il monitoraggio delle deformazioni.



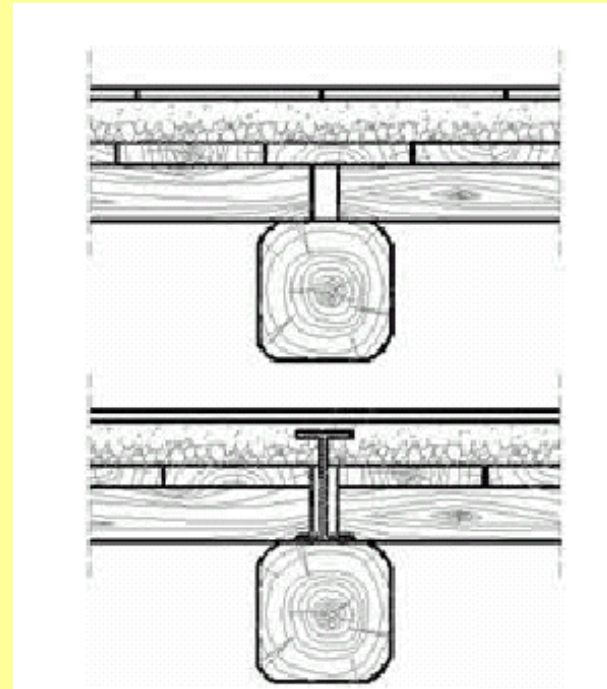
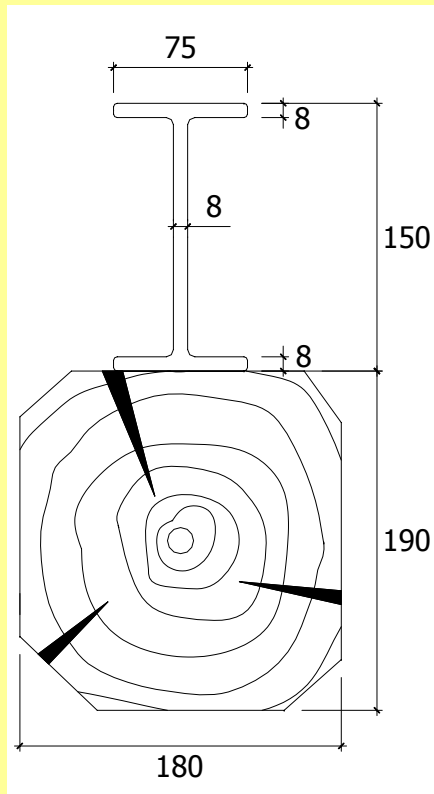
Particolare della lamella in CFRP utilizzata

## Sperimentazione n. 6 - Azzano (Spoleto)



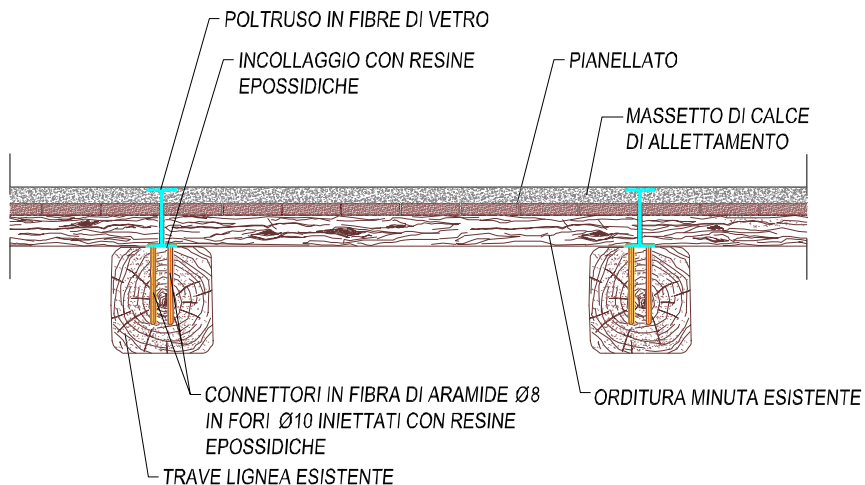
**Rinforzo orditura secondaria di un solaio ligneo  
(Intervento e sperimentazione: Ing. Andrea Giannantoni)  
Travetti 10×10 cm interasse 38 cm  
Vincolo Soprintendenza (no a smontaggio pavimento)**

## Sperimentazione n.7 rinforzo con trave in pultruso

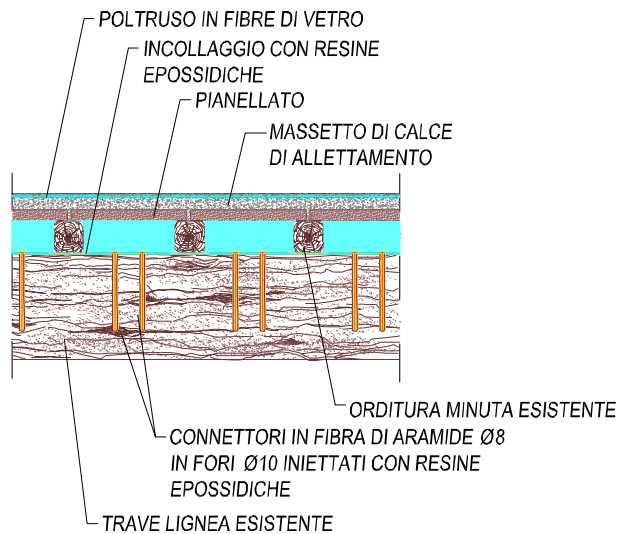


In collaborazione con: ing. A. Trimboli (Roma) e Ediltecnica (Foligno)

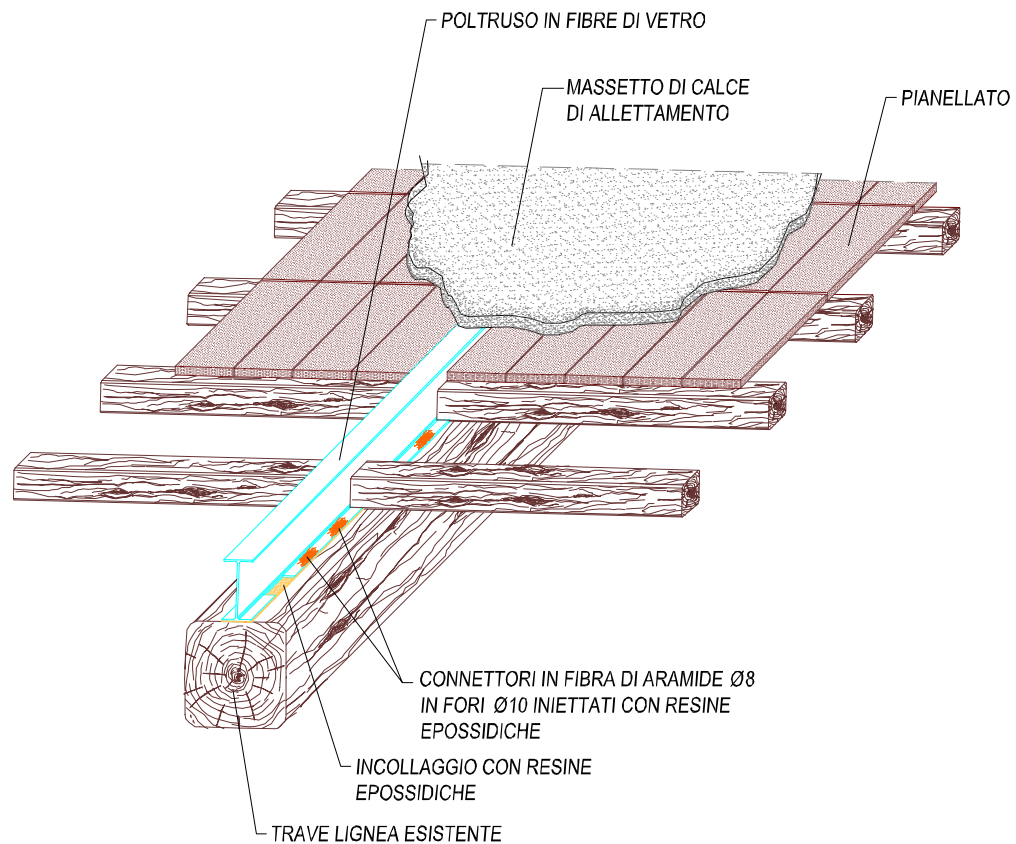
# COMPOSITI E MURATURE



SEZIONE



VISTA LATERALE



VISTA ASSONOMETRICA

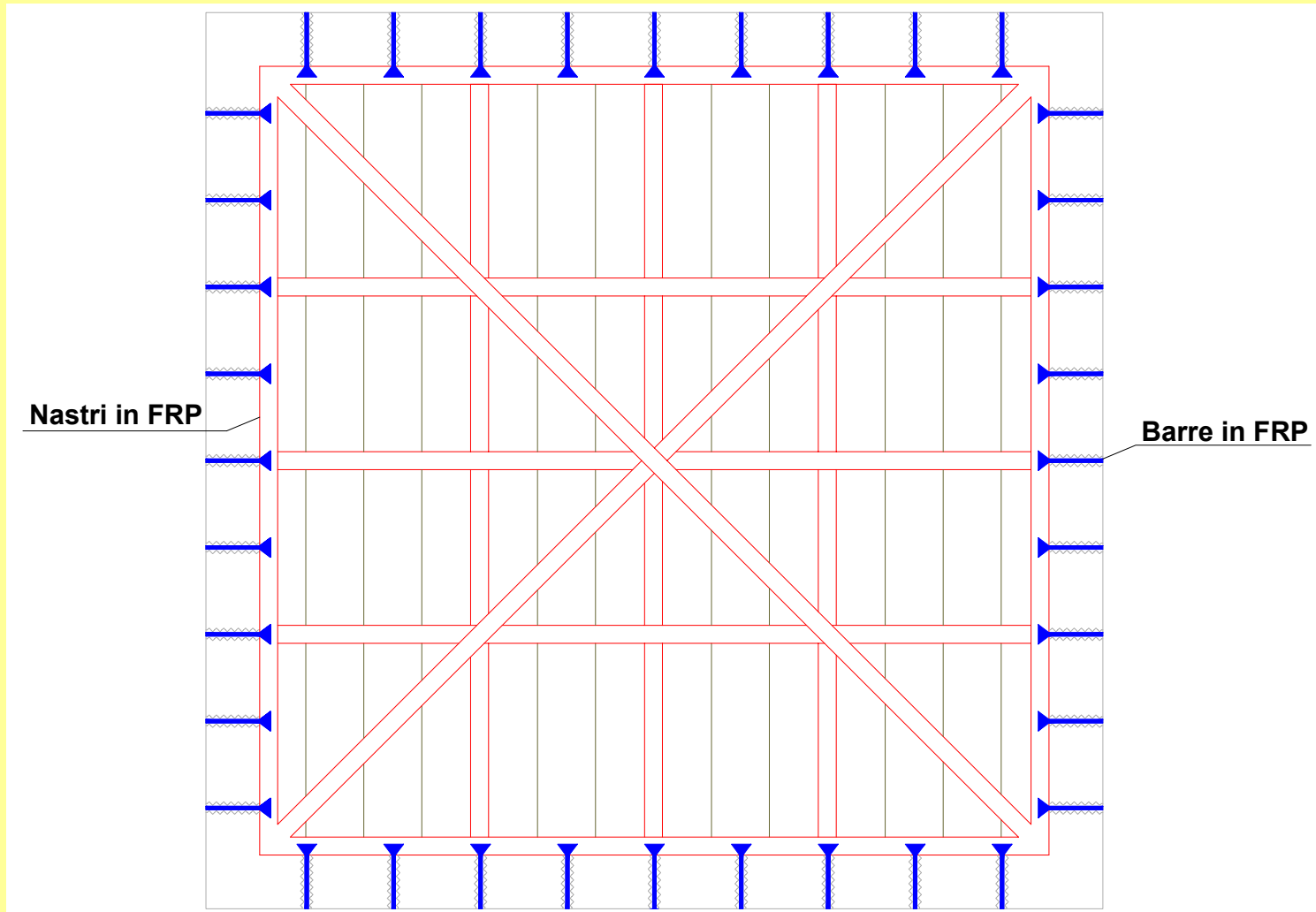
CONSOLIDAMENTO DI SOLAIO LIGNEO ESISTENTE  
CON POLTRUSO IN GFRP

# COMPOSITI E MURATURE





# Irrigidimento di solai (nel proprio piano)



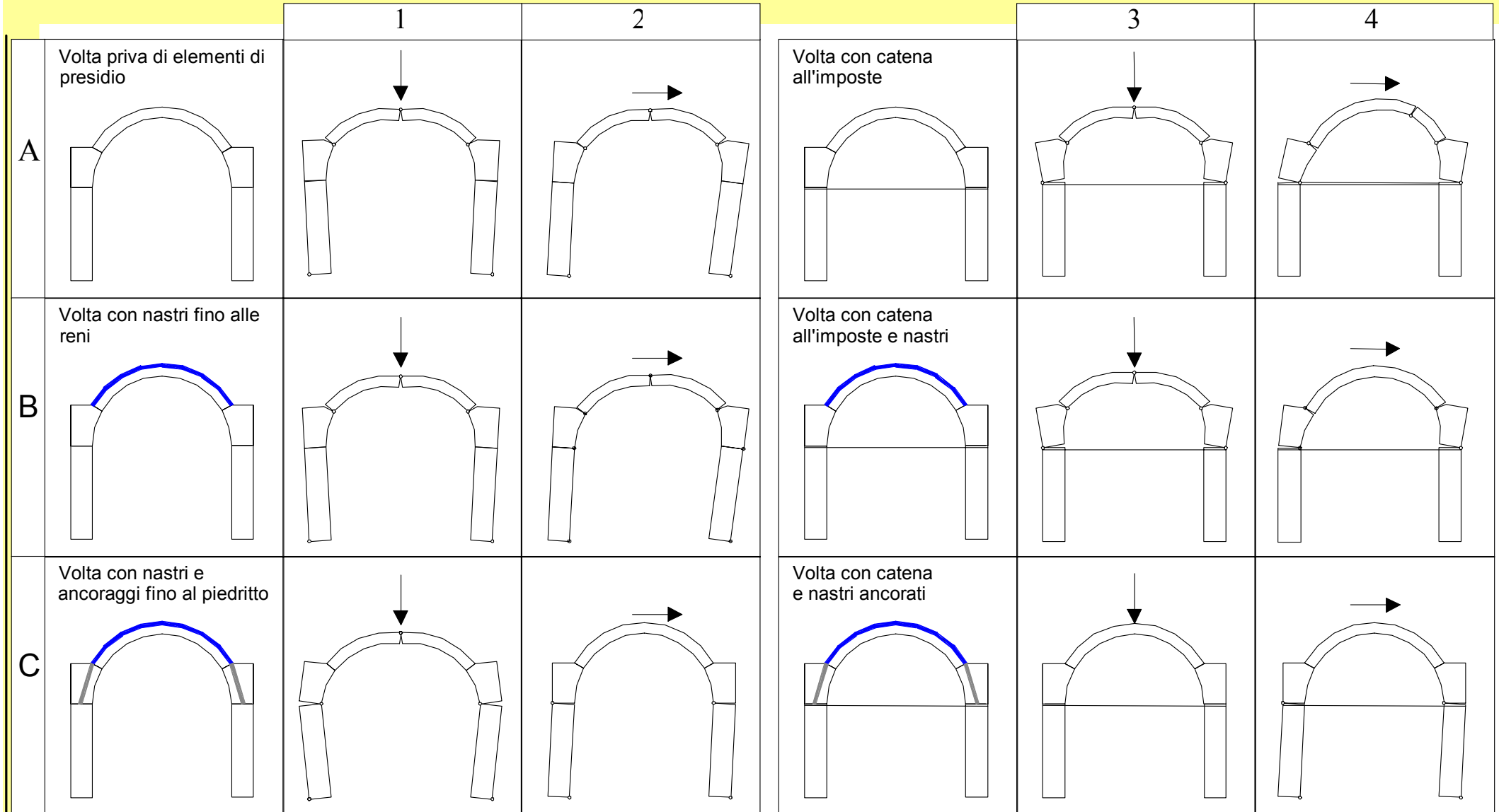
# COMPOSITI E MURATURE



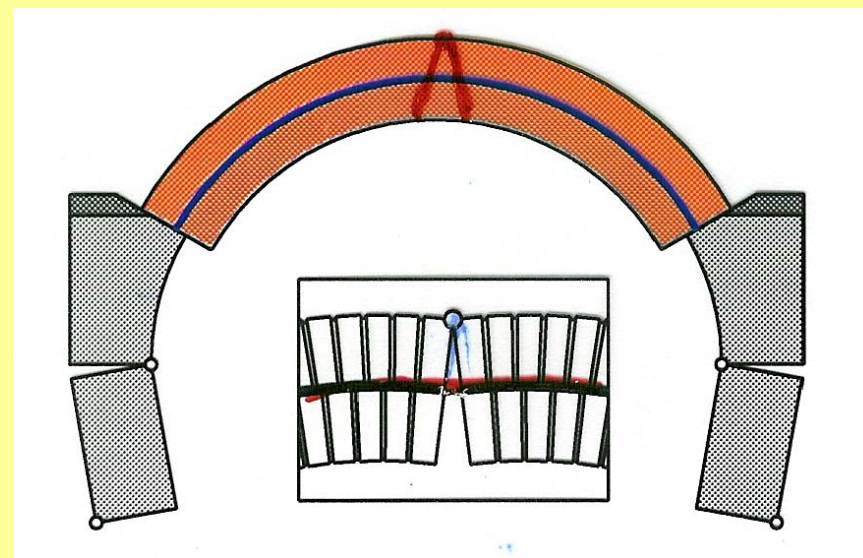
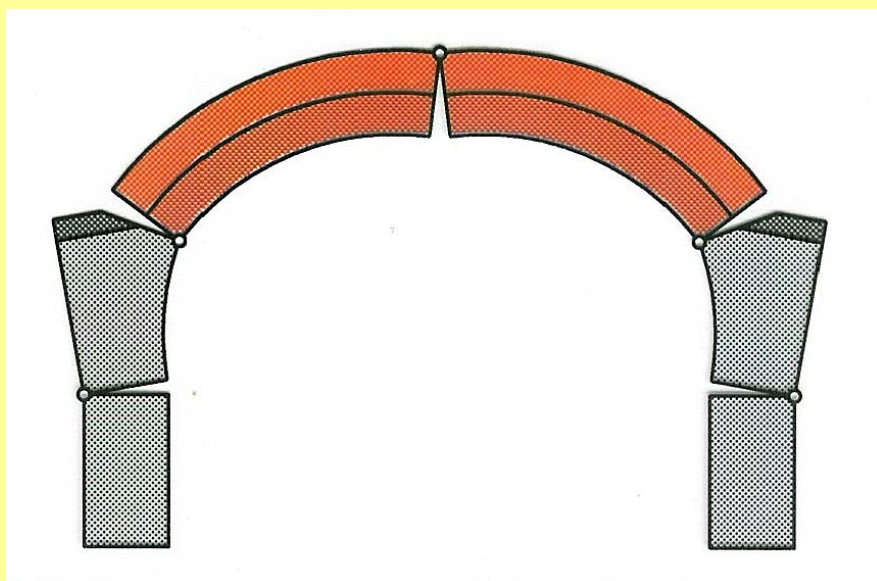
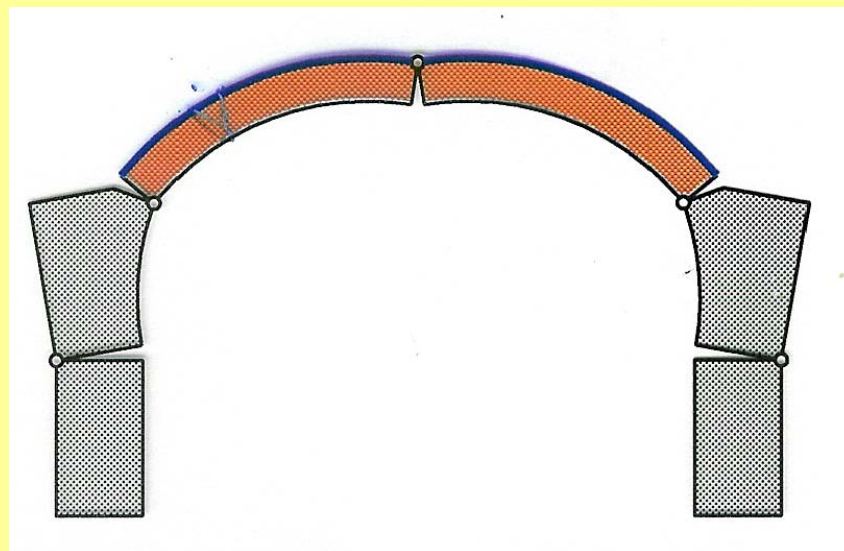
## Archi e volte



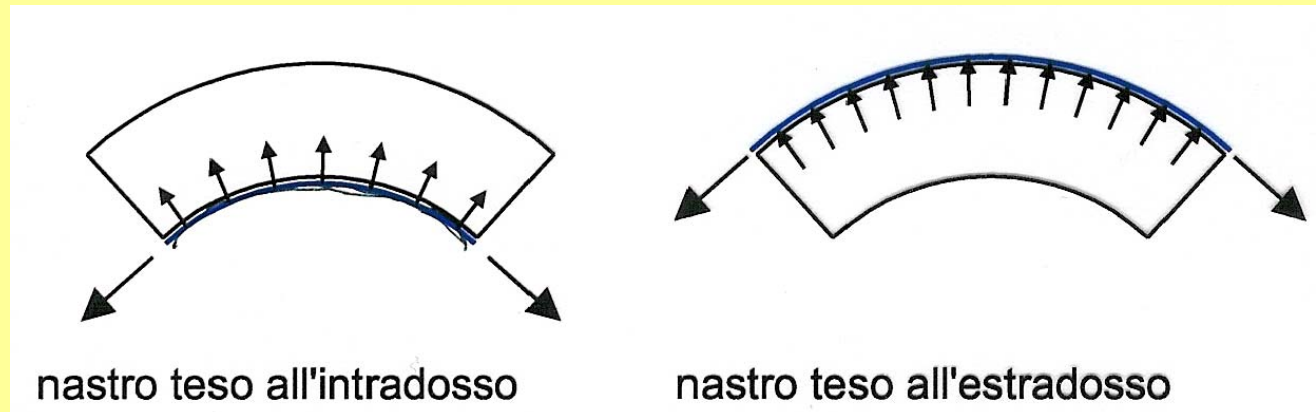
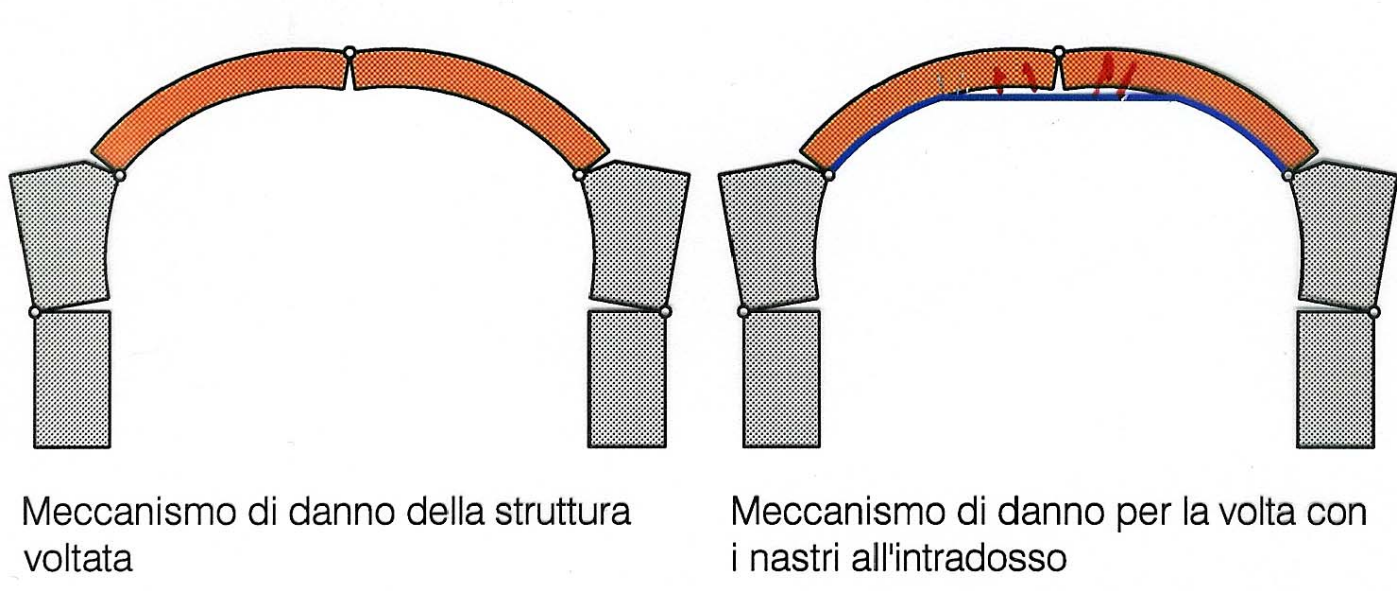
## Rinforzi con FRP



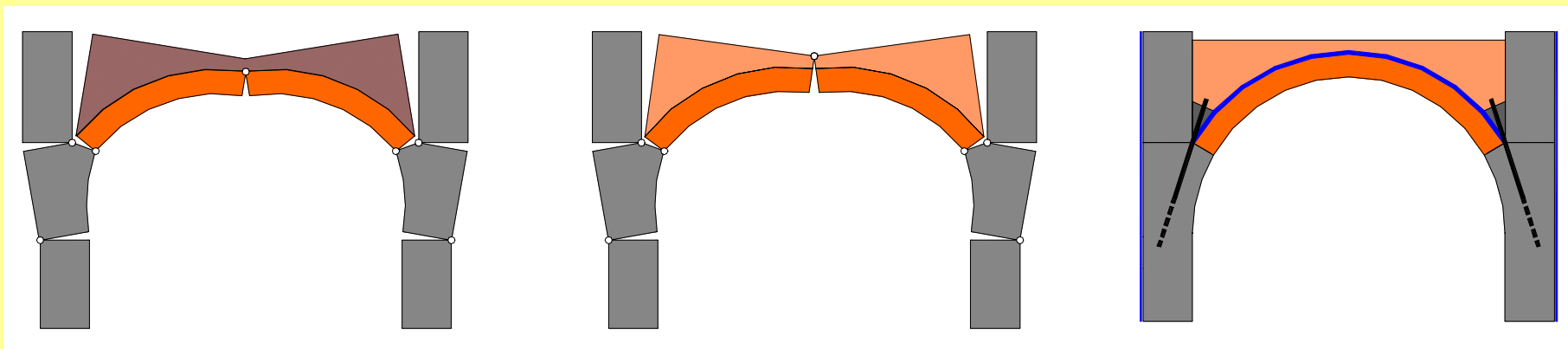
## Rinforzo estradossale



## Rinforzo intradosso



## Frenelli

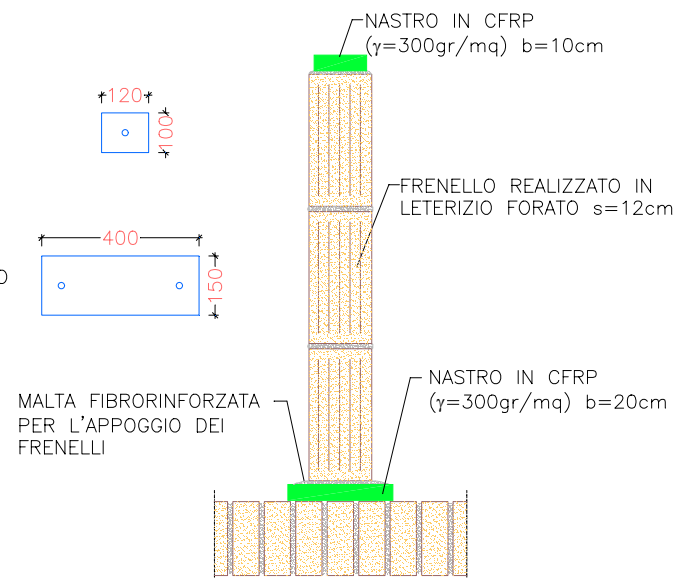
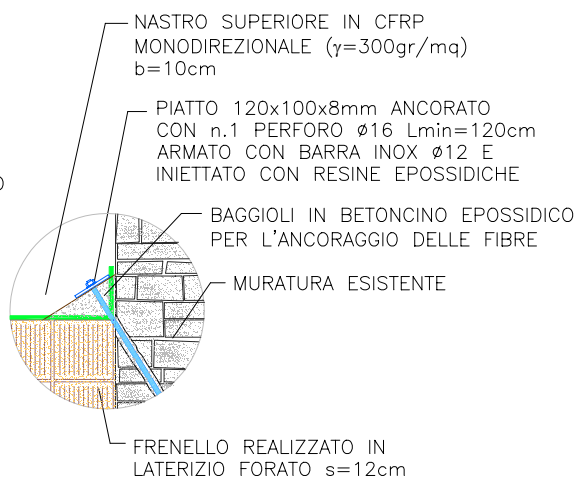
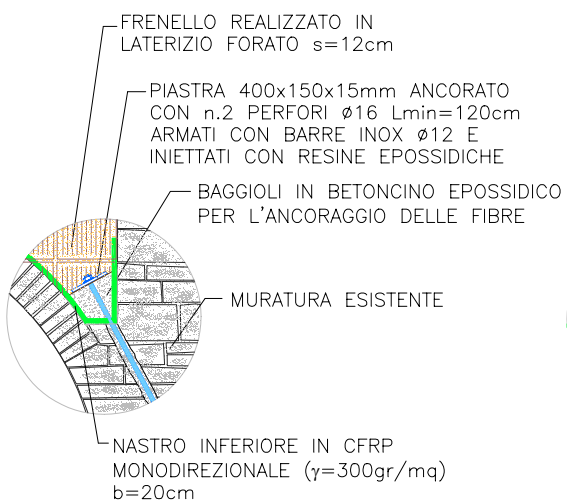
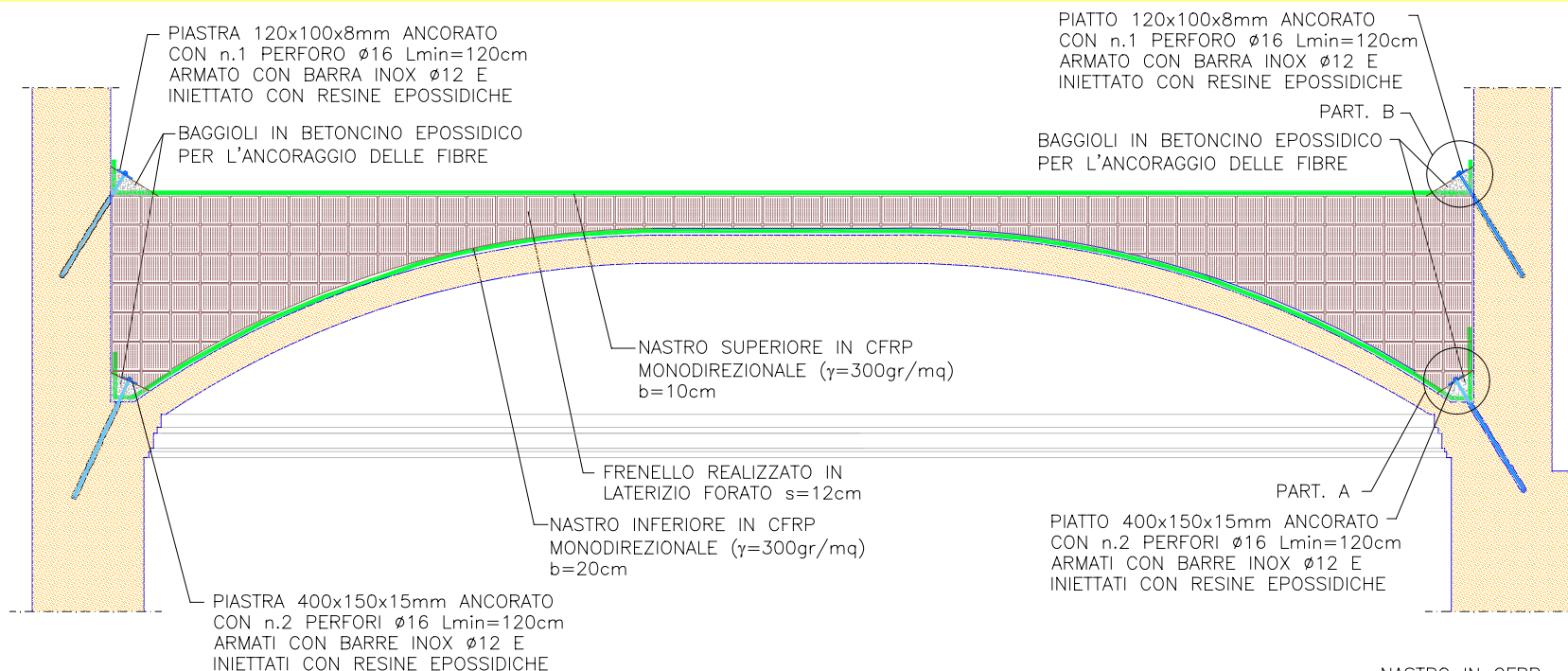


Con rinfianchi

Con frenello

Con frenello e FRP

## Frenello armato

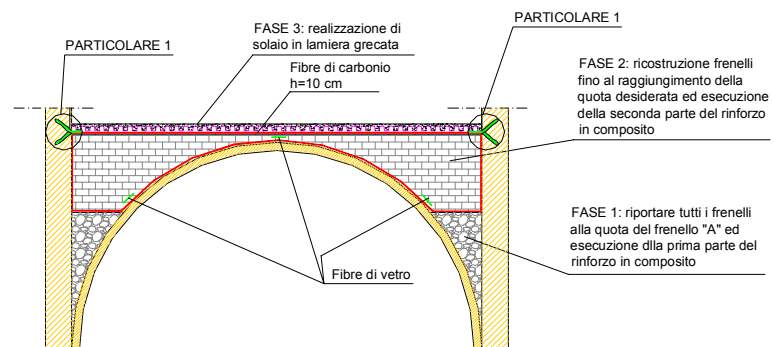




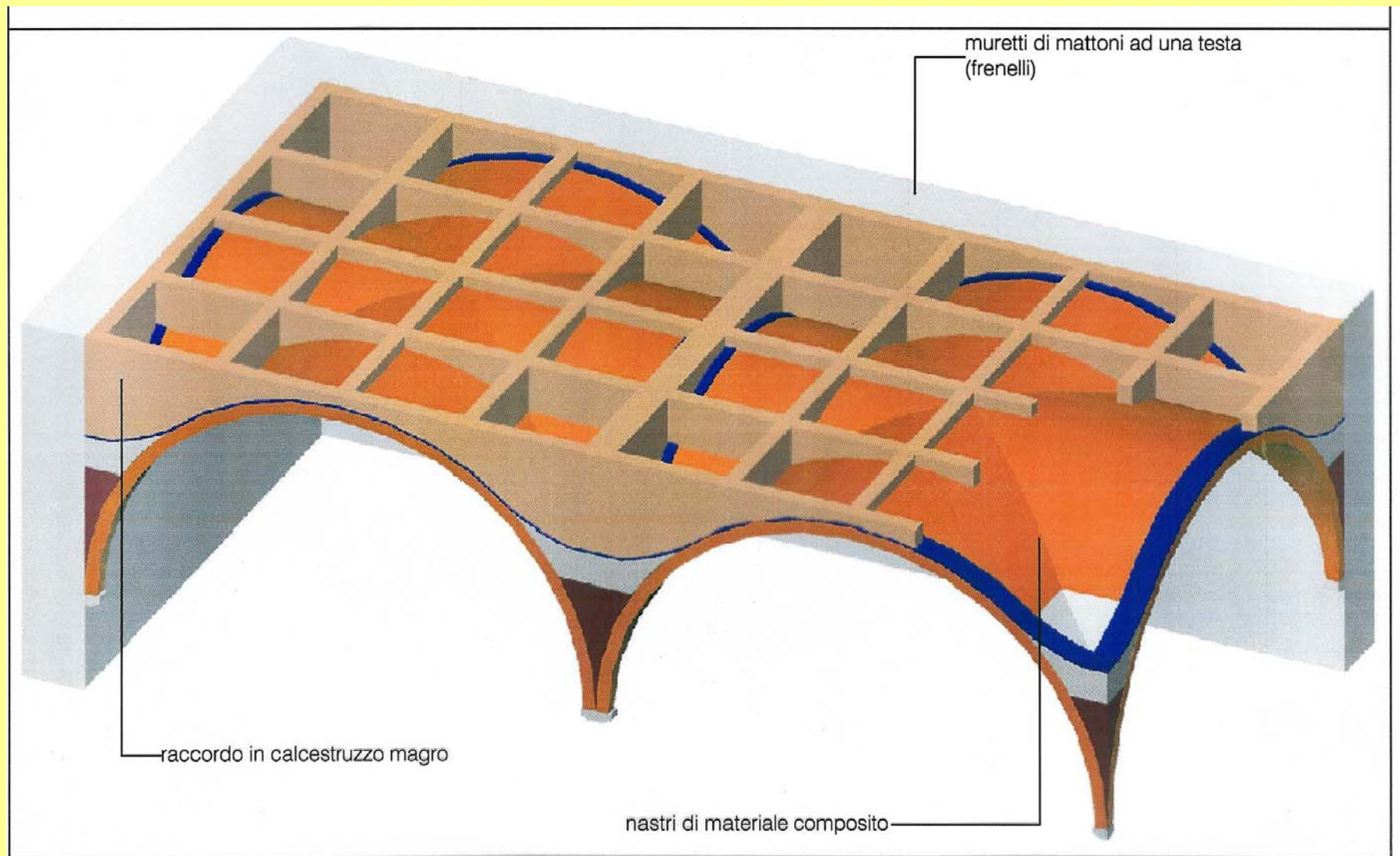
## Duomo di Prato



FASE 3 - Realizzazione del solaio in lamiera grecata



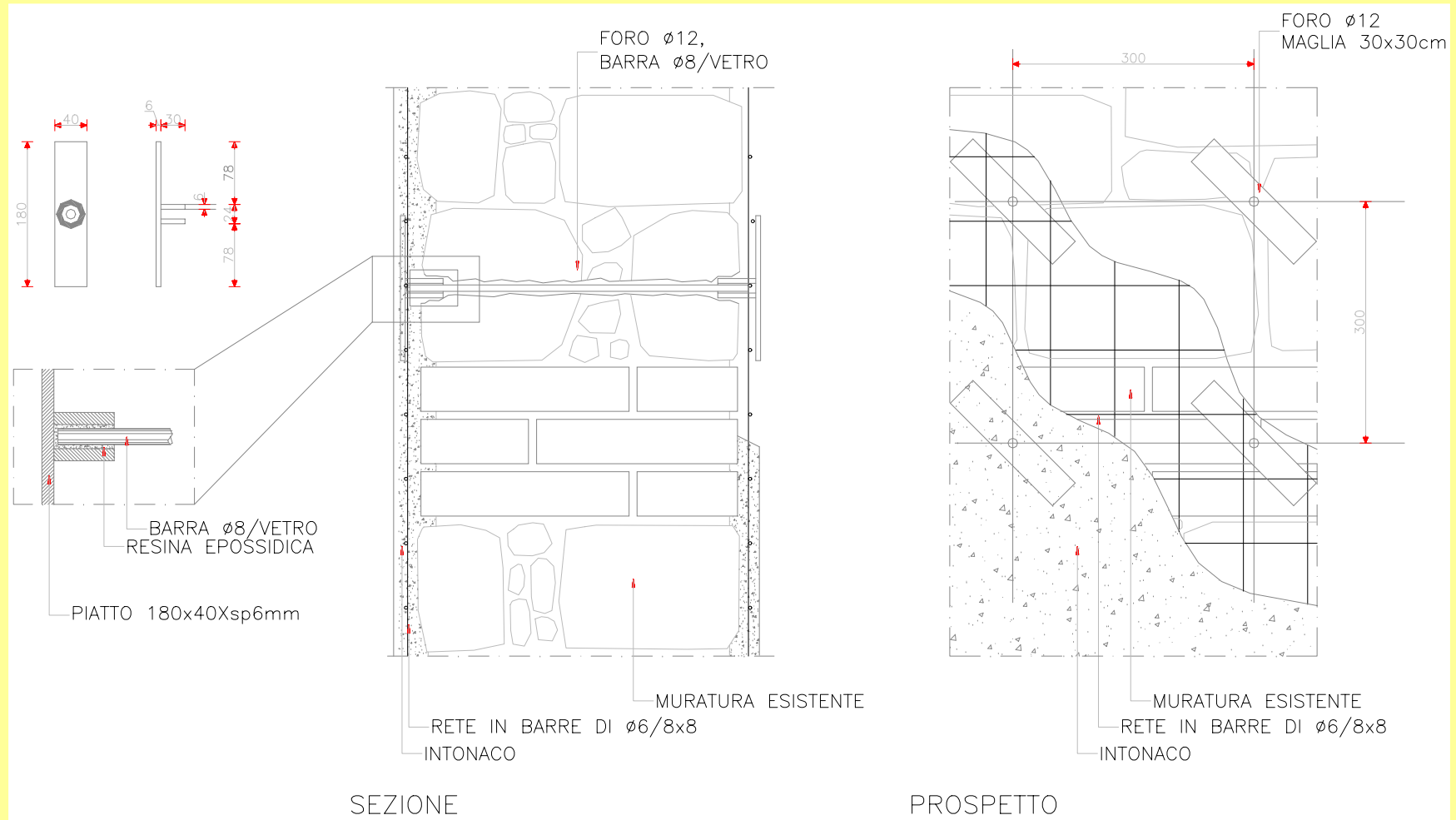
# COMPOSITI E MURATURE



# COMPOSITI E MURATURE



## Intonaco armato con FRP



## Intonaco armato con rete in FRP

