



## RESTAURO RECUPERO RIQUALIFICAZIONE Il progetto contemporaneo nel contesto storico

Giovedì 11 Novembre 2010 ore 14.30  
Savoia Excelsior Hotel - TRIESTE

### IL RECUPERO STRUTTURALE NELL'ANTICO Problemi strutturali e soluzioni tecniche

Prof. Ing. Natalino Gattesco  
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale  
Università degli Studi di Trieste

1



Restauro Recupero Riqualificazione  
Il progetto contemporaneo nel contesto storico

Trieste, 11-10-2010

## INTRODUZIONE

**LA SICUREZZA DI UNA STRUTTURA PUO' ESSERE VALUTATA SOLO IN TERMINI PROBABILISTICI** (quindi con la consapevolezza che col verificarsi di una o più situazioni sfavorevoli, ritenute poco probabili, si possono superare uno o più stati limite)

**IL RISCHIO DI PERDITA DI FUNZIONALITA', DI COMPARSA DI DISSESTI O DI CROLLO DELLA COSTRUZIONE VIENE FISSATO SULLA BASE DI ANALISI COSTI-BENEFICI** (mettendo naturalmente in primo piano la salvaguardia dell'incolumità dell'uomo).

**TALE RISCHIO TENDE AD AUMENTARE NEL CORSO DELLA VITA DELLA STRUTTURA PER L'INTERVENTO DI FATTORI NUOVI CHE MODIFICANO IL COMPORTAMENTO STRUTTURALE ORIGINARIO**





## FATTORI CHE AUMENTANO IL RISCHIO

QUESTI FATTORI RIGUARDANO:

- Il progressivo degrado dei materiali per effetto dell'aggressione atmosferica
- Il degrado strutturale dovuto alla ciclicità delle sollecitazioni (carichi ripetuti, variazioni termiche, gelo-disgelo)
- L'aumento dei carichi variabili per cambio di destinazione d'uso
- L'esecuzione di opere in prossimità (scavi, gallerie, nuovi edifici, ecc.)
- La modifica di alcune parti della struttura (realizzazione di aperture, soppressione di vincoli, ecc.)

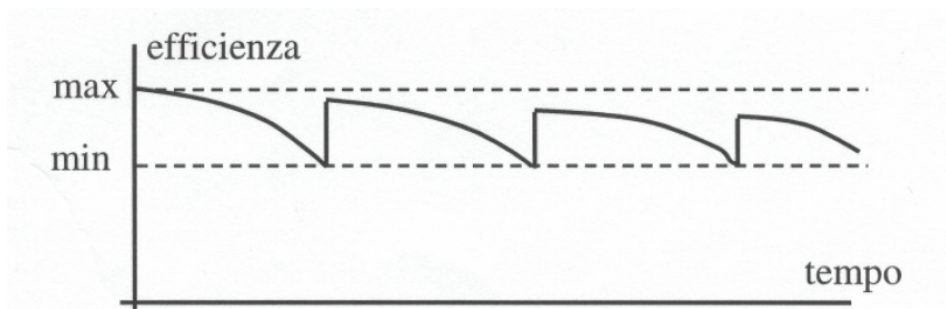


## VERIFICA PERIODICA

L'INTERVENTO DI TALI FATTORI RICHIEDE, QUINDI:

UNA VERIFICA PERIODICA DELLE STRUTTURE

Controllo che la sicurezza della struttura non scenda al di sotto di una determinata soglia limite.





## **EVENTI ECCEZIONALI**

LA SICUREZZA DI UNA STRUTTURA, INOLTRE, PUO' ESSERE  
SERIAMENTE RIDOTTA DA EVENTI QUALI

- I terremoti
- Gli smottamenti
- Le esplosioni

QUESTI EVENTI PROVOCANO DANNI PIU' O MENO GRAVI IN  
DIVERSE PARTI STRUTTURALI (la costruzione in genere diventa  
immediatamente inagibile)



## **MESSA IN SICUREZZA**

IN TUTTI QUESTI CASI DI SUPERAMENTO DELLA SOGLIA DI  
RISCHIO ACCETTABILE E' NECESSARIO INTERVENIRE CON  
OPERE DI RIPARAZIONE E/O RAFFORZAMENTO

**MESSA IN SICUREZZA**

INOLTRE PER GARANTIRE L'EFFICIENZA DELL'OPERA NEL TEMPO  
E' NECESSARIO PREVEDERE UNA

**MANUTENZIONE PROGRAMMATA**





## **INDAGINE CONOSCITIVA**

LO SCOPO DEGLI INTERVENTI DI RIPARAZIONE E RAFFORZAMENTO STRUTTURALE E' DI CONFERIRE ALLE STRUTTURE DI EDIFICI ESISTENTI UN LIVELLO DI SICUREZZA ADEGUATO ALLA FUNZIONE

PER RICERCARE IL METODO DI INTERVENTO PIU' IDONEO E' NECESSARIO PROCEDERE AD UN'APPROFONDITA

### **INDAGINE CONOSCITIVA**



## **INDAGINE CONOSCITIVA**

- Rilievo geometrico (dimensioni effettive parti strutturali)
- Indagine storica (ricostruzione variazioni nel tempo)
- Indagini sperimentali per la caratterizzazione dei materiali (prove soniche, prove di taglio, martinetti piatti, ultrasuoni, carotaggi, ecc.)
- Rilievo del quadro fessurativo (diretto, fotogrammetrico) con mappatura di ogni singola lesione (apertura, estensione)





## DIAGNOSTICA

ALLA FASE DI INDAGINE SEGUE UNA FASE DI ANALISI DEI DATI OTTENUTI PER VALUTARE LO STATO ATTUALE DELLE STRUTTURE ED INDIVIDUARE LE CAUSE CHE HANNO PROVOCATO LA CADUTA DI EFFICIENZA (degrado materiali, fessurazioni più o meno estese, dissesti statici, ecc.)

### DIAGNOSTICA PER IL RESTAURO



## DIAGNOSTICA

- Esecuzione di simulazioni strutturali condotte con modello numerico di primo tentativo (*legami costitutivi lineari*)
- Interpretazione quadro fessurativo per individuare gli effettivi meccanismi resistenti
- Eventuale monitoraggio per controllare l'evoluzione delle fessure presenti (apertura ed estensione) e gli spostamenti relativi fra diversi punti della struttura (deformazioni flessionali, verticalità elementi, ecc.)
- I risultati del monitoraggio consentono anche di affinare il modello numerico

### INTERVENTO STRUTTURALE PIU' ADEGUATO





## TECNICHE DI INTERVENTO

- LE FASI DI INDAGINE E DIAGNOSTICA CONSENTONO DI CONOSCERE LO STATO DI UNA STRUTTURA E DI INDIVIDUARE LE CAUSE CHE HANNO PROVOCATO LA RIDOTTA EFFICIENZA
- **L'OBIETTIVO DELL' INTERVENTO E' DI MIGLIORARE LE CARATTERISTICHE PRINCIPALI CHE GOVERNANO IL COMPORTAMENTO STRUTTURALE AL FINE DI METTERE IN SICUREZZA LA STRUTTURA**



## TECNICHE DI INTERVENTO

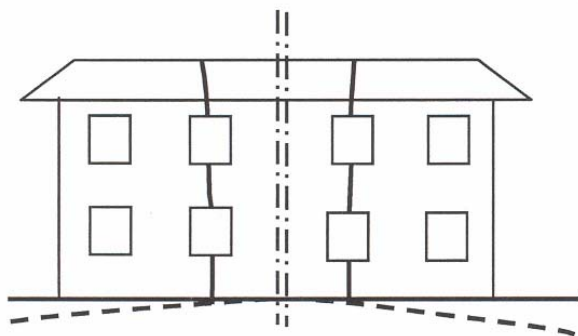
- GLI INTERVENTI STRUTTURALI POSSONO ESSERE
  - Locali (riguardano opere su singoli elementi strutturali mirate principalmente al miglioramento delle caratteristiche meccaniche dei materiali)
  - Globali (riguardano opere che tendono a modificare il funzionamento dell'intera struttura)
- **E' NECESSARIO FAR PRECEDERE LA RIMOZIONE DELLE CAUSE CHE HANNO CONDOTTO LA STRUTTURA AD UN LIVELLO DI SICUREZZA INADEGUATO**



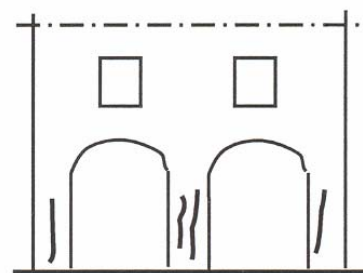


## CONSIDERAZIONI SULLE MURATURE

- FREQUENTEMENTE LE MURATURE SONO FESSURATE PER
  - Cedimenti differenziali delle fondazioni (a)
  - Carichi verticali eccessivi (colonne) (b)



a)

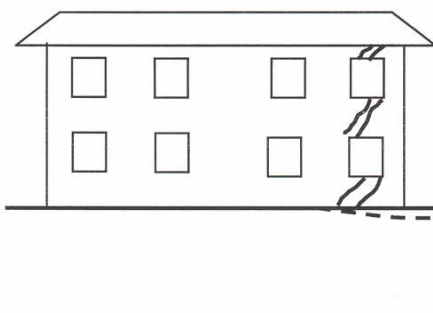


b)

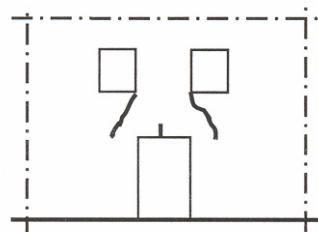


## CONSIDERAZIONI SULLE MURATURE

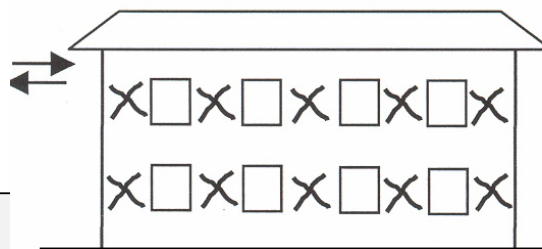
- FREQUENTEMENTE LE MURATURE SONO FESSURATE PER
  - Esecuzione di scavi o nuovi edifici nelle vicinanze (c)
  - Errate impostazioni strutturali e/o vizi esecutivi (d)
  - Eventi sismici (e)



c)



d)



e)

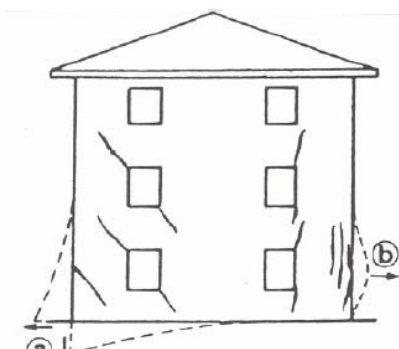






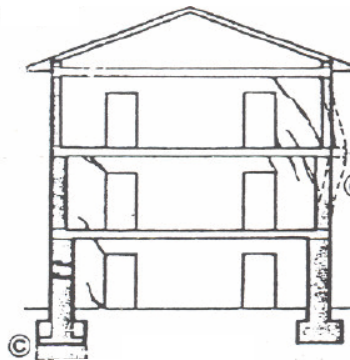
## FESSURE COME INDICATORI

- QUADRI FESSURATIVI PROVOCATI DA CEDIMENTI E SPINTE



Lesioni tipiche dovute a spostamenti localizzati:

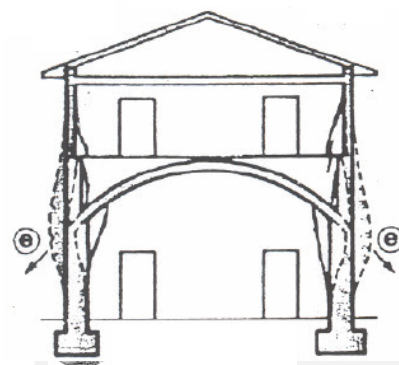
- a) per spostamento laterale dello spigolo dell'edificio;
- b) per schiacciamento della struttura muraria;



c) per cedimento fondale della parete di facciata;

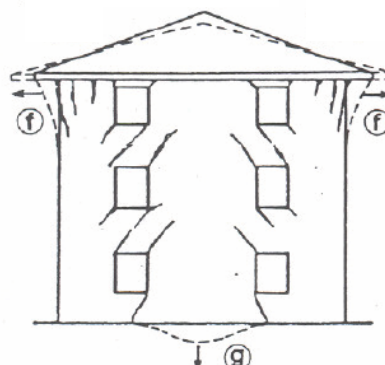
d) per spinta verso l'esterno delle strutture di solaio;

e) per effetto di spinta della struttura a volta interna;



f) per presenza di copertura spingente;

g) per cedimento fondale nella zona intermedia di facciata.

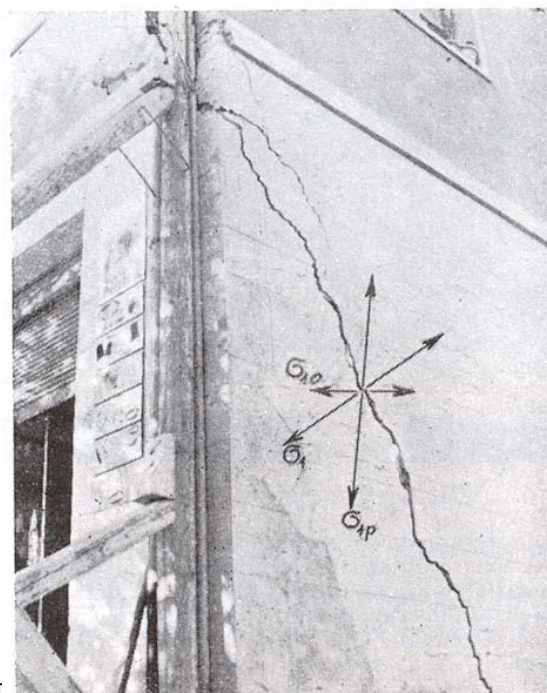
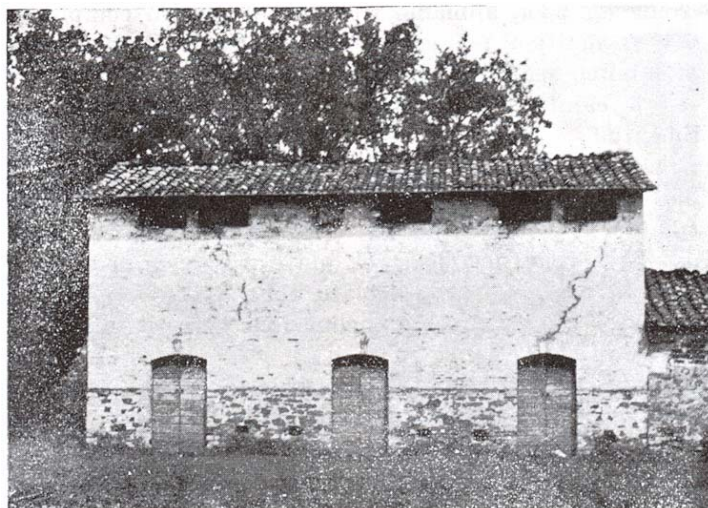


15



## FESSURE COME INDICATORI

- Quadri fessurativi provocati da cedimenti verticali di estremità' del fabbricato







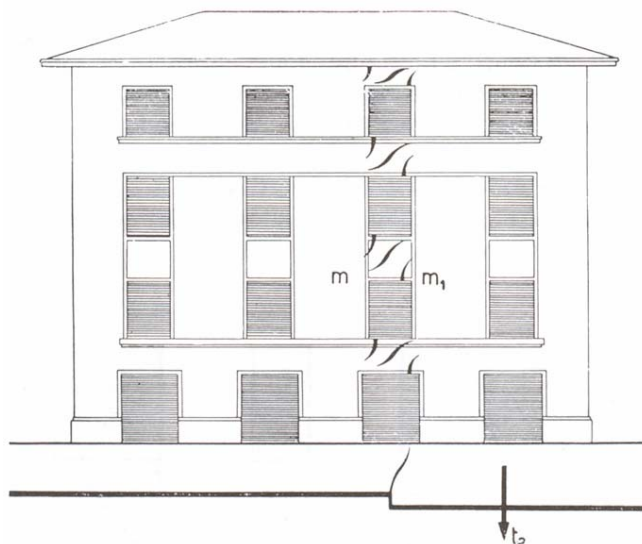
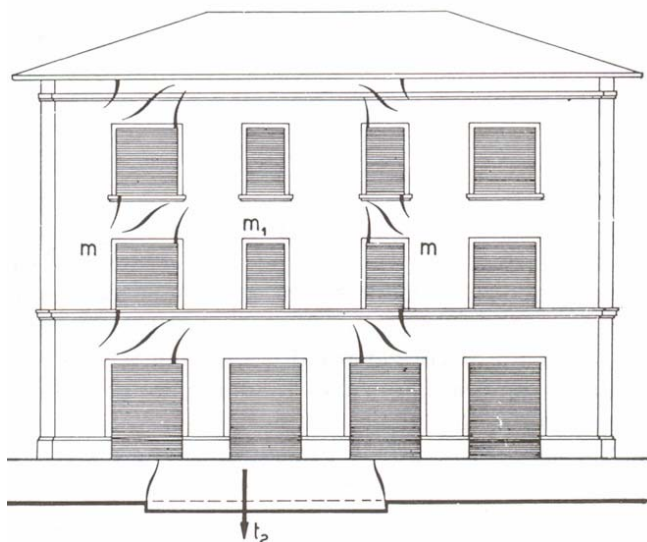
## FESSURE COME INDICATORI

- Quadri fessurativi provocati da cedimenti verticali in zona centrale al fabbricato



## FESSURE COME INDICATORI

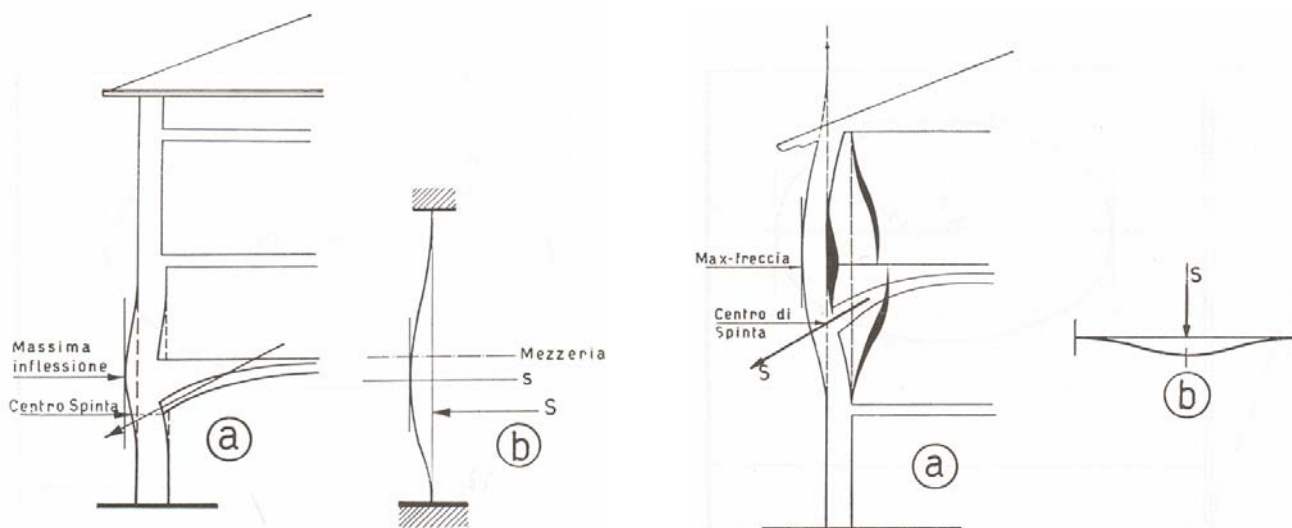
- Quadri fessurativi provocati da cedimenti verticali





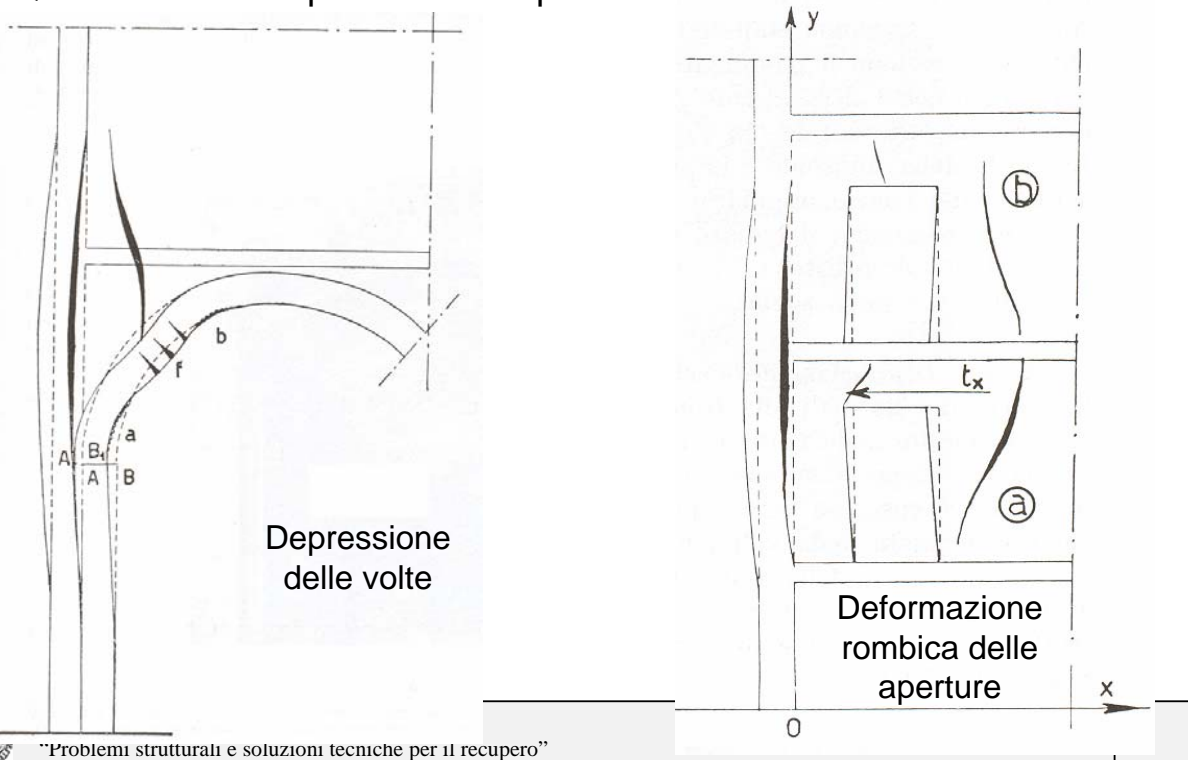
## FESSURE COME INDICATORI

- Quadri fessurativi provocati da spinte di archi e volte



## FESSURE COME INDICATORI

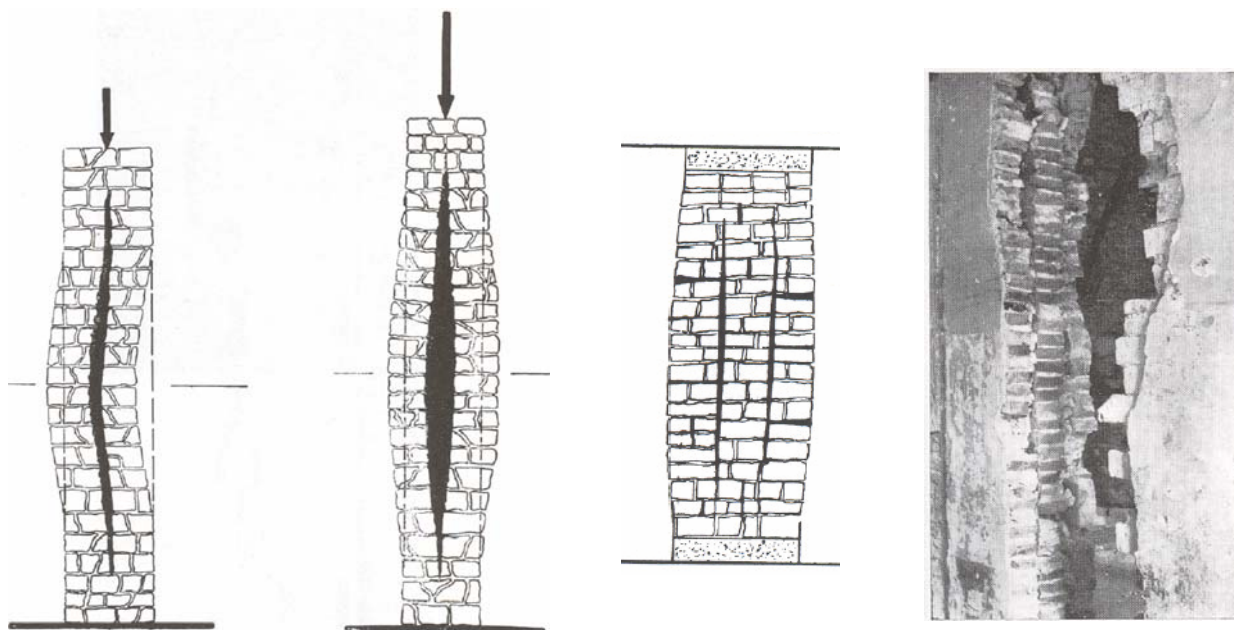
- Quadri fessurativi provocati da spinte di archi e volte





## FESSURE COME INDICATORI

- Quadri fessurativi nel piano della muratura



## CARICO CRITICO MURATURE

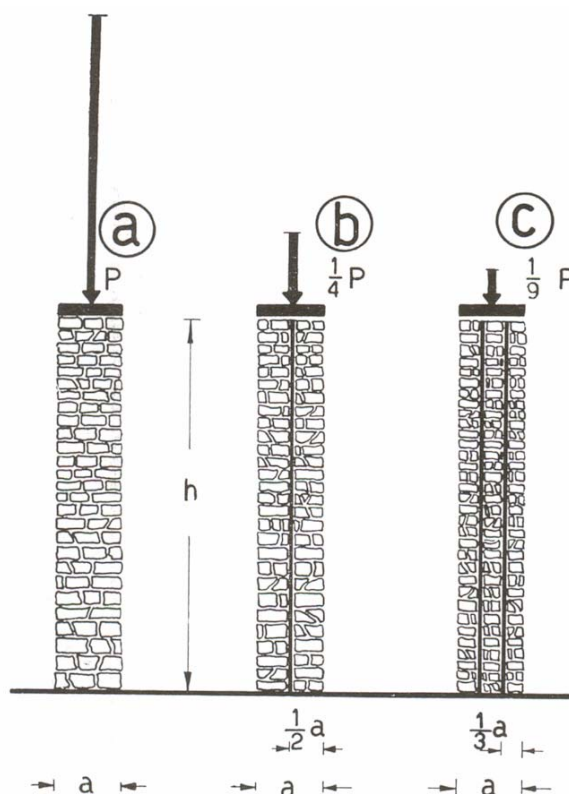
- MURATURA A PIU' PARAMENTI

Le murature sono in genere elementi snelli. Se si calcola il carico critico Euleriano per tre murature di ugual spessore: singolo paramento, due paramenti affiancati, tre paramenti affiancati, si ottiene:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2}{12} \cdot \frac{Ea^3}{I_0^2}$$

$$\frac{P_{cr,b}}{P_{cr,a}} = \frac{1}{4}$$

$$\frac{P_{cr,c}}{P_{cr,a}} = \frac{1}{9}$$







## TECNICHE DI RINFORZO PER MURATURE

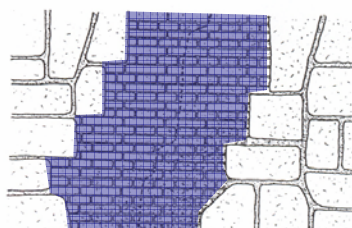
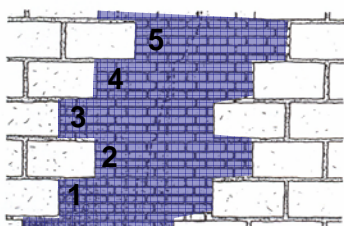
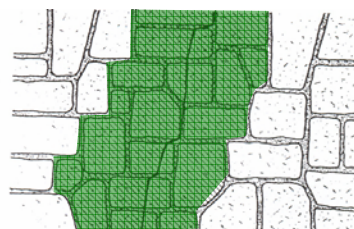
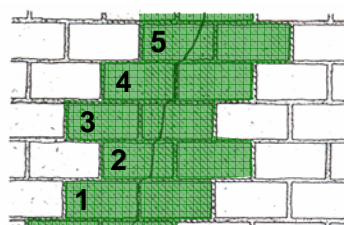
D.M. 14.01.2008 e Circolare Cons. Sup. LL. PP. 617 2-2-2009

- **Scuci e cucì** (per riparazioni locali di fessure o zone danneggiate)
- **Inserimento diatoni artificiali**
- **Iniezioni di miscele leganti**
- **Realizzazione camicie in rete metallica e betoncino**
- **Realizzazione camicie in rete in GFRP e intonaco**
- **Tirantature orizzontali e verticali**
- **Rinforzi con nastri in FRP**
- **Rinforzo con cuciture attive (sistema CAM)**



## SCUCI E CUCI

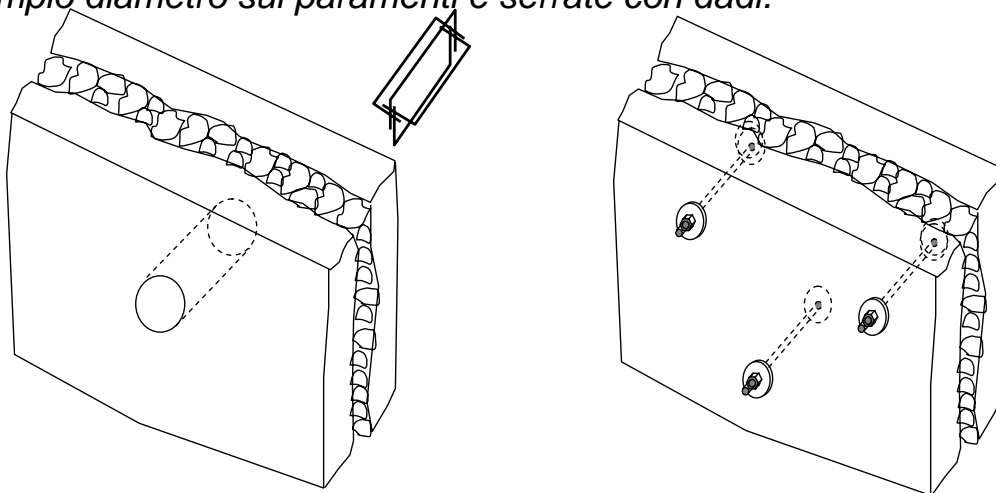
- Quando si hanno fessure ampie e frastagliate è opportuno riparare le lesioni mediante rimozione della muratura ammalorata e sostituzione della stessa con muratura nuova. In quest'operazione è importante utilizzare materiali il più possibile simili, in termini di caratteristiche meccaniche, a quelli originali





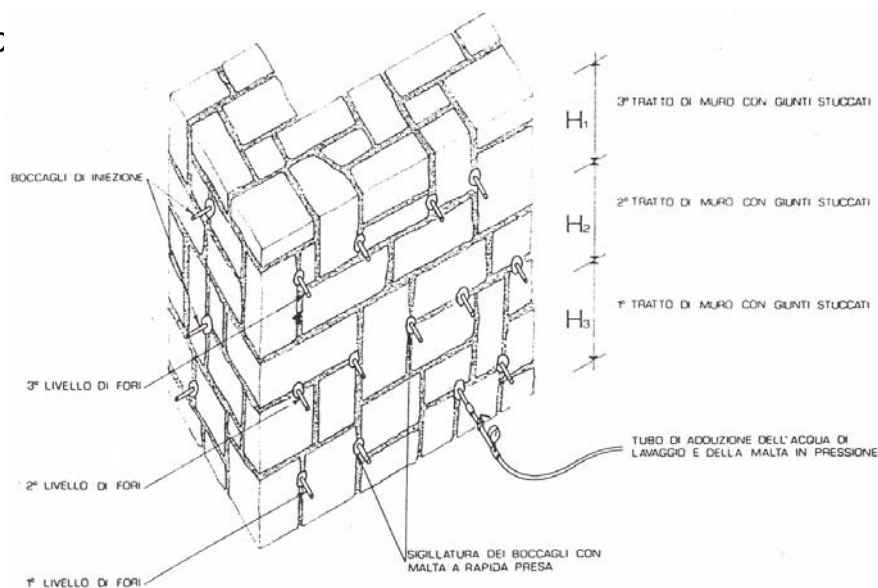
## DIATONI ARTIFICIALI

- *Diatoni realizzati in calcestruzzo armato dentro fori di carotaggio*
- *Creano un collegamento fra i paramenti murari evitando il loro distacco*
- *Un alternativa, nel caso di interventi limitati, è rappresentata dai tirantini antiespulsivi, costituiti da barre metalliche filettate passanti con rondelle di ampio diametro sui paramenti e serrate con dadi.*



## INIEZIONI DI MISCELE LEGANTI

- *Le murature in pietrame presentano spesso numerosi vuoti al proprio interno, distribuiti pressoché uniformemente*
- *Il riempimento di questi vuoti con materiale cementizio conduce ad un sensibile aumento della resistenza della muratura (tecnica ampiamente utilizzata nella riparazione degli edifici dopo il sisma del 1976 in Friuli)*







## INIEZIONI DI MISCELE LEGANTI

- *Iniezione di malta cementizia molto fluida a pressione controllata (max 2.5÷3.0 atm). E' in genere necessaria una quantità di malta variabile fra 50 e 150 kg per m<sup>3</sup> di parete.*

Sheppard, Tomazevic 1986

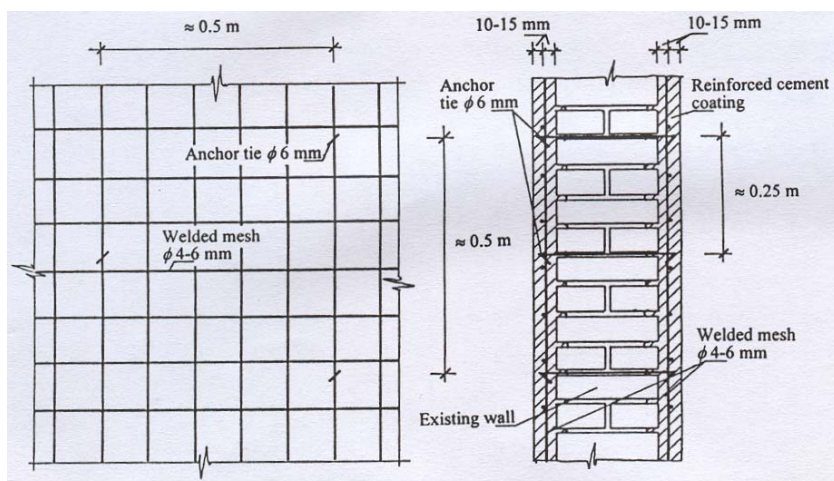
Masonry type	Original		Cement-grouted	
	$f_{tk}$ (MPa)	G (MPa)	$f_{tk}$ (MPa)	G (MPa)
Two-leaf, uncoursed stone (rural)	0.08	90	0.18	160
Two-leaf, uncoursed stone (urban)	0.12	150	0.23	300
Compact, uncoursed stone and brick (urban)	0.21	-	0.38	-

- *Questi valori evidenziano un notevole miglioramento della resistenza a taglio della muratura.*
- *Per quantificare l'incremento di resistenza è in genere necessario eseguire delle prove in-situ prima e dopo l'iniezione.*



## CAMICIE IN RETE E BETONCINO

- *Consiste nell'utilizzo di armature metalliche disposte sulla superficie delle pareti, collegate fra loro con barre passanti attraverso la muratura, e realizzazione di due lastre in calcestruzzo dello spessore di circa 3÷4 cm*



- *Demolizione dell'intonaco*
- *Rimozione di circa 10÷15 mm di malta dai giunti sui due lati*
- *Esecuzione fori con attrezzo a rotazione per staffe di collegam.*
- *Rimozione detriti e pulizia con acqua delle superfici*
- *Inserimento barre (6φ6/m<sup>2</sup>) e iniezione con malta espansiva*
- *Applicazione primo strato di malta cementizia (~15 mm)*
- *Messa in opera rete e collegamento della stessa con le staffe*
- *Applicazione secondo strato di malta cementizia (~15÷25 mm)*





## CAMICIE IN CALCESTRUZZO

- *L'incremento di resistenza è inversamente proporzionale con la qualità delle murature originarie: importante nel caso di murature di qualità scadente, diventa via-via più modesto all'aumentare della qualità della muratura*

Sheppard, Tomazevic 1986

Type of masonry		Type of reinfor. cement	Resistance		Multiplier
Masonry unit Grade	Mortar Grade		Original (kN)	Strengthened (kN)	
Brick B 20	M 0.4	Steel	34	118	3.5
Brick B 10	M 0.3	Steel	47	167	3.6
C. block B 7.5	M 5	Steel	128	167	1.3



## NTC 2008

Tabella C8A.2.2 - Coefficienti correttivi dei parametri meccanici (indicati in Tabella C8A.2.1) da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone o ottime; giunti sottili; ricorsi o listature; sistematiche connessioni trasversali; nucleo interno particolarmente scadente e/o ampio; consolidamento con iniezioni di malta; consolidamento con intonaco armato.

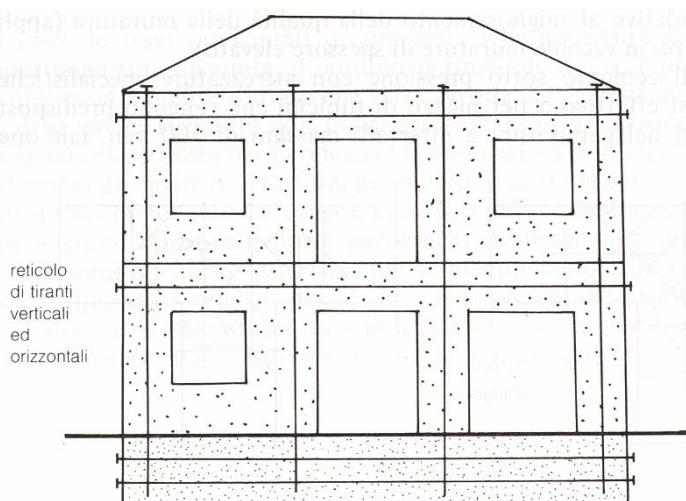
Tipologia di muratura	Malta buona	Giunti sottili (<10 mm)	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Nucleo scadente e/o ampio	Iniezione di miscele leganti	Intonaco armato *
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	-	1,3	1,5	0,9	2	2,5
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e	1,4	1,2	1,2	1,5	0,8	1,7	2
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	-	1,1	1,3	0,8	1,5	1,5
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,5	1,5	-	1,5	0,9	1,7	2
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1,2	1,2	-	1,2	0,7	1,2	1,2
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	1,5	1,5	-	1,3	0,7	1,5	1,5





## TIRANTATURE ORIZZONTALI E VERTICALI

- La tecnica consiste nella realizzazione di fori in direzione orizzontale e/o verticale nella muratura, con attrezzo a rotazione, e nell'alloggiamento di barre metalliche ad alta resistenza (Dywidag o trefoli) post-tese.
- Alle estremità si dispongono opportuni dispositivi metallici o in calcestruzzo armato per la ripartizione del carico

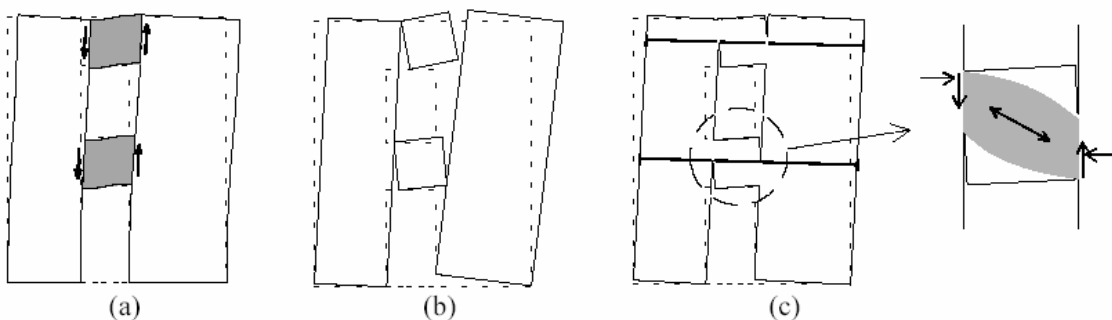


- Tiranti verticali negli angoli dell'edificio ed in corrispondenza dei maschi
- Tiranti orizzontali in corrispondenza dei solai di piano per irrobustire le fasce di piano
- Tiranti orizzontali in fondazione per realizzare travi alte
- Le sedi dei tiranti generalmente vengono iniettate di malta cementizia per proteggere le armature dalla corrosione



## TIRANTATURE ORIZZONTALI E VERTICALI

- La resistenza a taglio (scorrimento, fessurazione diagonale) aumenta sensibilmente al crescere della tensione di compressione
- Le tirantature consentono di incrementare tale tensione, sia nei maschi che nelle fasce di piano, senza dover incrementare la massa della struttura, che comporterebbe anche un aumento dell'azione sismica
- Le tirantature orizzontali sono indispensabili, se non ci sono cordoli o catene a livello dei solai, per impedire il "rocking" delle fasce di piano
- Le tirantature verticali consentono, fra l'altro, di impedire il "rocking" dei maschi al piano sottotetto, quando la copertura è leggera (es. in legno)

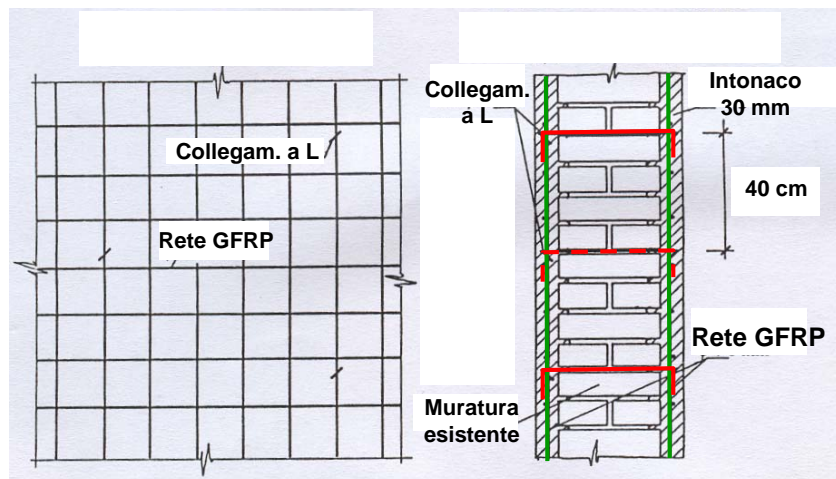






## TECNICA DI RINFORZO CON RETE IN GFRP

- Consiste nell'utilizzo di reti in GFRP disposte sulla superficie delle pareti, collegate fra loro con connettori a L giuntati per sovrapposizione all'interno di fori passanti attraverso la muratura, e realizzazione di intonaco di malta bastarda dello spessore di circa 3 cm

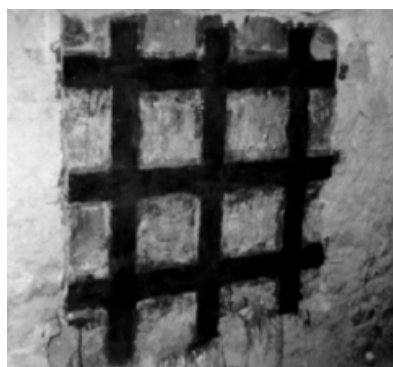


- Demolizione dell'intonaco esist.
- Rimozione di circa 10÷15 mm di malta dai giunti sui due lati
- Applicazione rinzaffo
- Esecuzione fori con attrezzo a rotazione per elem. di collegam.
- Rimozione detriti dai fori
- Messa in opera rete
- Inserimento connettori (6/m<sup>2</sup>) e iniezione con resina epossidica
- Applicazione secondo strato di intonaco (~25÷30 mm)



## RINFORZO CON NASTRI IN FRP

- Consiste nell'utilizzo di nastri in FRP (con fibre di carbonio, vetro o aramide) fatti aderire alle strutture murarie mediante collanti epossidici o poliuretanici.



- Problemi di perdita di aderenza (debonding)





## RINFORZO CON SISTEMA CAM

- *Consiste nell'utilizzo di nastri di acciaio che producono delle cuciture attive trasversali e longitudinali nelle pareti in muratura.*



0.3g



1.0g

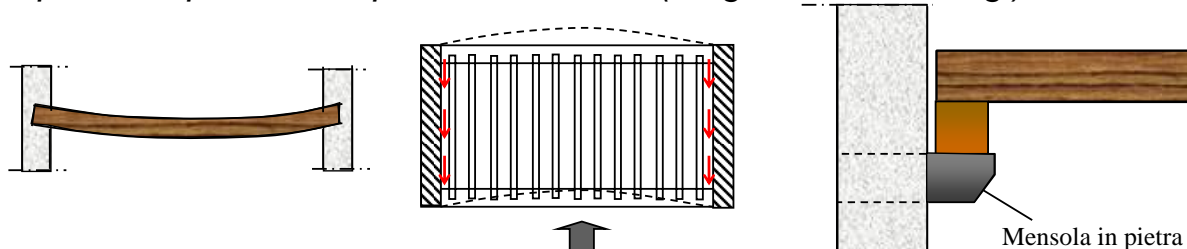


## PROBLEMI SOLAI DI PIANO

La maggior parte degli edifici dei centri storici sono caratterizzati da solai di piano costituiti da impalcati in legno

### I solai in genere

- *sono progettati per sovraccarichi modesti*
- *hanno deformabilità flessionale eccessiva*
- *hanno scarsa rigidezza nel proprio piano*
- *il collegamento con le pareti è in genere scarso*
- *possono presentare parti ammalorate (funghi, insetti xilofagi)*

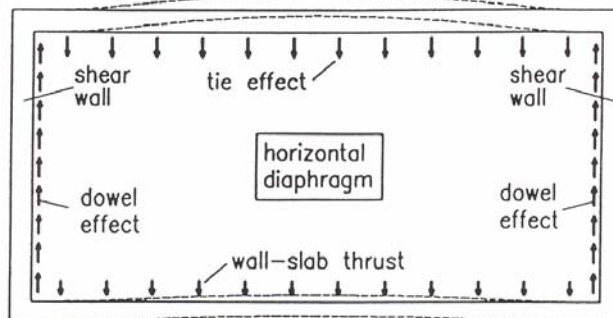






## INTERVENTI SUI SOLAI DI PIANO

- **Recupero dei solai in legno mediante interventi mirati a migliorare il loro comportamento**
  - Aumento capacità portante
  - Aumento della rigidità flessionale (limitare la freccia)
  - Irrigidimento del solaio nel proprio piano in modo che sia in grado di trasferire le azioni orizzontali alle pareti di taglio
- Efficace collegamento tra il solaio e le murature affinché:
  - *vengano impediti gli spostamenti fuori piano delle pareti*
  - *vengano trasferite le azioni orizzontali alle pareti di taglio*



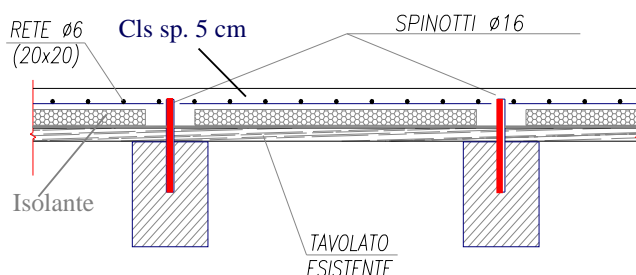
Azione orizzontale



## AUMENTO CAPACITA' PORTANTE

Per aumentare la capacità portante e la rigidità flessionale di può procedere mediante:

- **Solidarizzazione di una soletta di calcestruzzo sopra le travi di legno**



Piazza-Turrini 1983  
Ronca-Gelfi-Giuriani 1991  
Spinelli 1992  
Gattesco 2001  
Giuriani 2002  
etc.

### TECNICHE DI CONNESSIONE

ESEGUIRE UN FORO  $\varnothing 15,75$  mm, INSERIRE A PRESSIONE UNO SPINOTTO IN ACCIAIO TONDO LISCIO  $\varnothing 16$  (Fe510) DI LUNGHEZZA 17 cm.  
IN ALTERNATIVA, ESEGUIRE UN FORO  $\varnothing 20$  mm, INSERIRE UNA BARRA  $\varnothing 16$  DI ACCIAIO AD ADERENZA MIGLIORATA FeB44k DI LUNGHEZZA 17 cm, COLARE RESINA EPOSSIDICA NEL FORO.

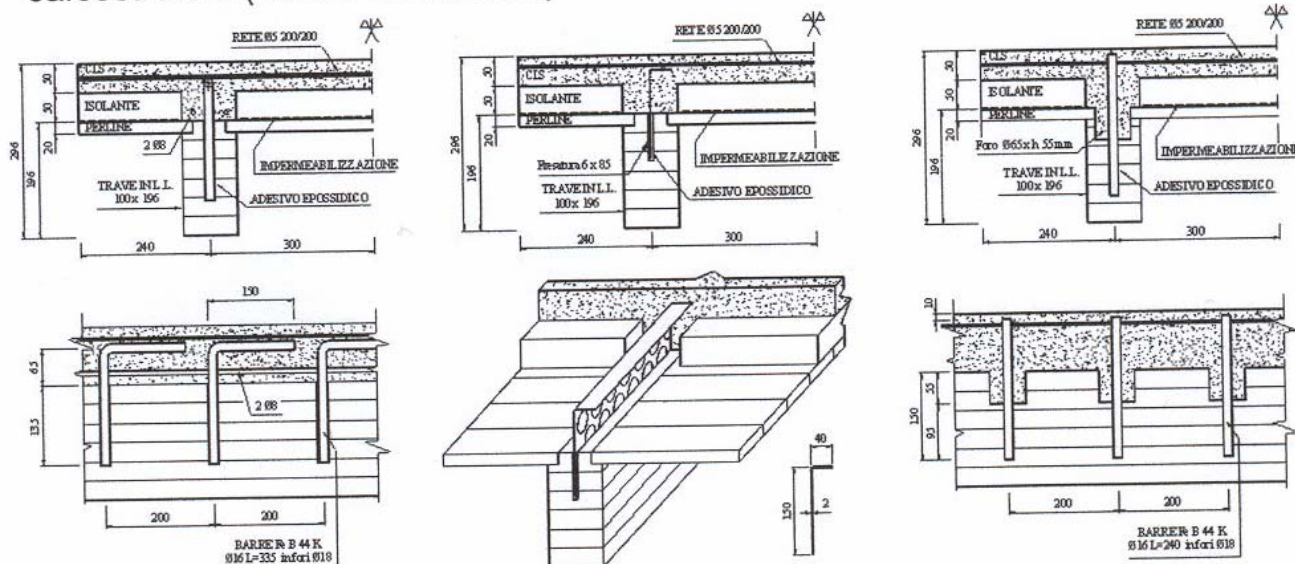




## CONNESSIONI LEGNO-CALCESTRUZZO

### Diverse tecniche di connessione

Strutture composte lignee con soletta di calcestruzzo (nuove costruzioni)



Prof. Ing. Natalino Gattesco  
“Problemi strutturali e soluzioni tecniche per il recupero”

39



## SOLAIO RINFORZATO CON SOLETTA IN CLS





## LIMITI RINFORZO CON SOLETTA

Per applicare tale tecnica è necessario modificare la quota finale del pavimento e questo talvolta è incompatibile con le strutture esistenti e le opere di finitura presenti.

Nel caso di interventi su edifici tutelati dalle Soprintendenze non viene accettata perchè considerata “invasiva” e poco “reversibile”.

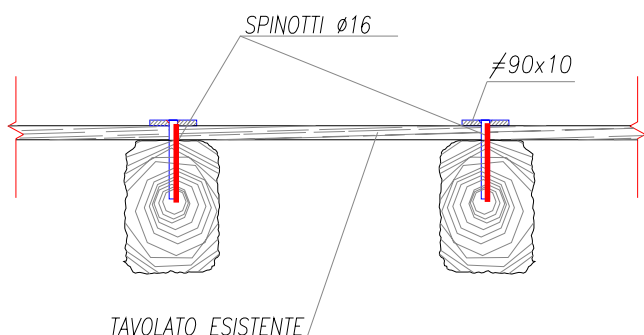
Inoltre non è considerata adeguata perchè utilizza materiali non compatibili con quelli originali della costruzione storica.



## AUMENTO CAPACITA' PORTANTE

Per aumentare la capacità portante e la rigidità flessionale si può procedere mediante:

- Solidarizzazione di piatti metallici sopra le travi di legno



### TECNICA DI RINFORZO

DISPORRE UN PIATTO 90x10 IN ACCIAIO, PROVVISORIO DI FORI Ø 16mm SVASATI VERSO L'ALTO, SOPRA IL TAVOLATO ESISTENTE IN CORRISPONDENZA DI OGNI TRAVE; ESEGUIRE UN FORO Ø15,75 NEL LEGNO IN CORRISPONDENZA DEI FORI DEL PIATTO DI ACCIAIO; INSERIRE A PRESSIONE UNO SPINOTTO IN ACCIAIO TONDO LISCIO Ø16 (Fe510) DI LUNGHEZZA 140 mm; SILDARE LO SPINOTTO AL PIATTO IN ACCIAIO RIEMPIENDO IL VUOTO DELLA SVASATURA.







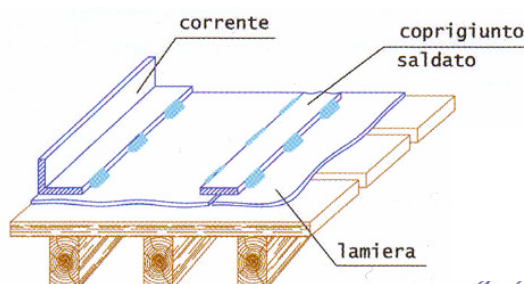
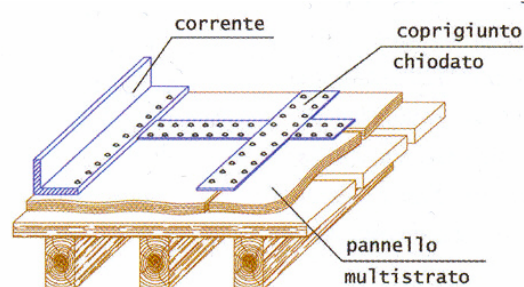
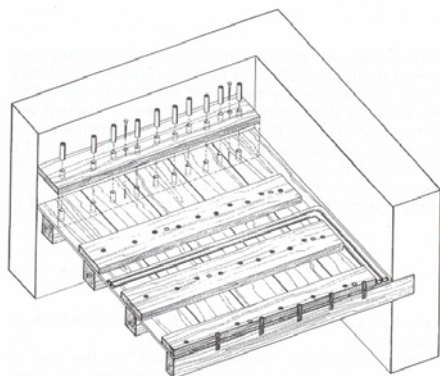
## SOLAIO RINFORZATO CON PIATTI DI ACCIAIO



## AUMENTO CAPACITA' PORTANTE

Altre tecniche di intervento “a secco”.

- Pannelli di legno (*Piazza, Giuriani*)
- Tavole di legno (*Piazza, Modena*)
- Lamiera di acciaio (*Giuriani*)



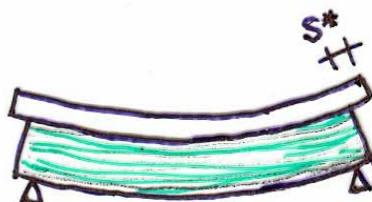
Tecniche che prevedono la solidarizzazione con pioli di acciaio.





## CONNESSIONE TRAVE-SOLETTA

Se si realizza la soletta senza collegarla alla trave in legno il solaio risulta penalizzato dal punto di vista statico in quanto sono aumentati i carichi (p.p.soletta).



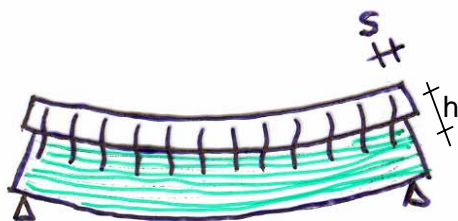
$$M_{Rd} = M_{Rd,w} + M_{Rd,c} \cong M_{Rd,w}$$

$$I = I_w + nI_c \cong I_w \quad n = \frac{E_c}{E_w}$$



## CONNESSIONE TRAVE-SOLETTA

Se invece si dispongono fra trave e soletta dei dispositivi in grado di ostacolare lo slittamento e di trasferire la forza di scorrimento da un elemento all'altro, si ha un forte aumento sia della capacità portante che della rigidezza.



$$s \ll s^* \quad n = \frac{E_c}{E_w}$$

$$I = I_w + nI_c + \gamma \cdot \frac{n \cdot A_c \cdot A_w}{A_w + n \cdot A_c} \cdot h^2 \gg I_w$$



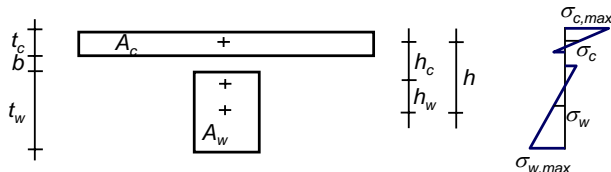




## SOLAIO COMPOSTO LEGNO-CLS

**S.L.E.**

$$\gamma = \left[ 1 + \pi^2 \frac{n E_w A_c A_w}{n A_c + A_w} \frac{p}{K l^2} \right]^{-1} \quad (\text{Efficienza connessione})$$



$p$  è il passo dei connettori

$K$  rigidezza del connettore

$$\begin{cases} \sigma_c = n \gamma h_c \frac{M}{I_{eff}} \\ \sigma_{m,c} = n \frac{t_c}{2} \frac{M}{I_{eff}} \\ \sigma_{c,max} = \sigma_{m,c} + \sigma_c \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_w = \gamma h_w \frac{M}{I_{eff}} \\ \sigma_{m,w} = \frac{t_w}{2} \frac{M}{I_{eff}} \\ \sigma_{w,max} = \sigma_{m,w} + \sigma_w \end{cases}$$

Forza su  
singolo piolo

$$F = p n A_c \gamma h_c \frac{V}{I_{eff}}$$



$$p = \frac{F I_{eff}}{n A_c \gamma h_c V}$$

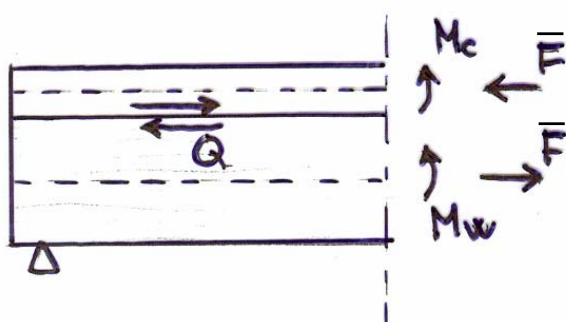
Forza di  
scorrimento  
unitaria



## MOMENTO RESISTENTE SOLAIO COMPOSTO

**S.L.U.**

$$M_{Rd} = M_{w,Rd}(\bar{F}) + M_{c,Rd}(\bar{F}) + \bar{F} h \gg M_{w,Rd}(\bar{F})$$



$$\bar{F} = \min \begin{cases} Q_{Rd} \\ F_{c,Rd} \\ F_{w,Rd} \end{cases}$$

$$Q_{Rd} = n_p P_{Rd}$$

$Q_{Rd}$  è la resistenza allo scorrimento fra la sezione di momento massimo e l'appoggio

$P_{Rd}$  è la capacità portante di un connettore

$n_p$  è il numero di connettori fra la sezione di momento massimo e l'appoggio

$F_{c,Rd}$  è la resistenza a compressione della soletta di calcestruzzo

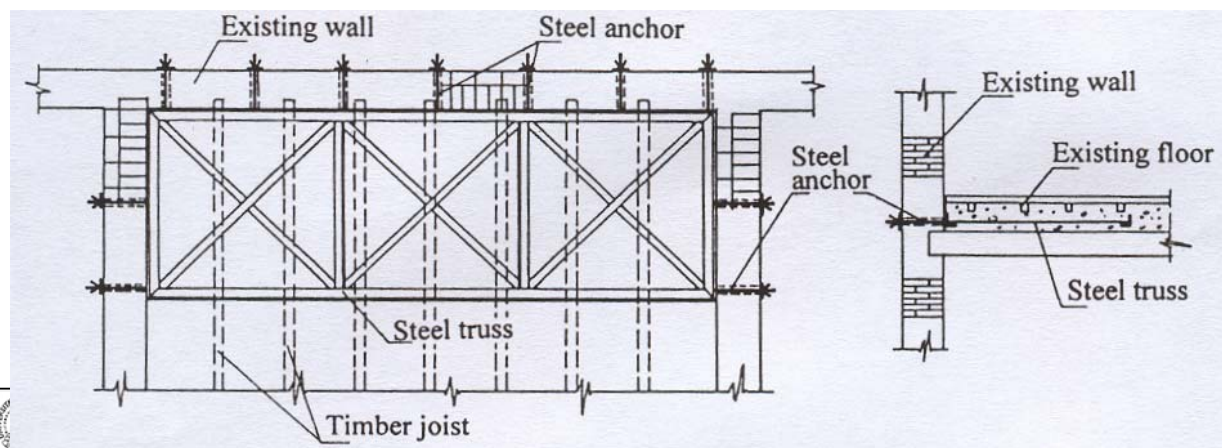
$F_{w,Rd}$  è la resistenza a trazione della trave di legno



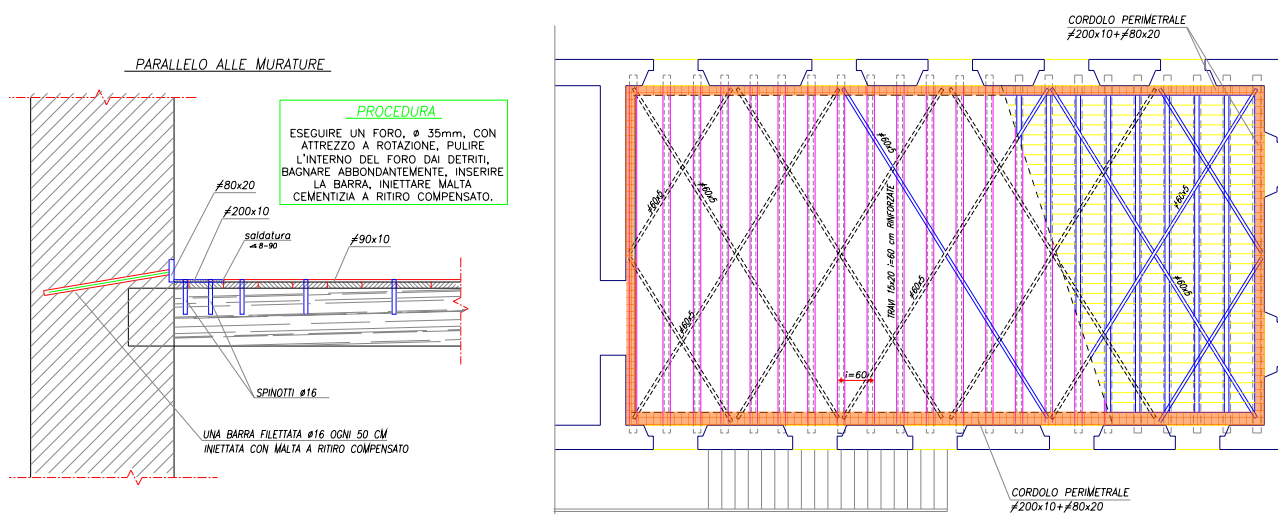


## IRRIGIDIMENTO SOLAI NEL PROPRIO PIANO

- La realizzazione di una soletta di calcestruzzo costituisce un ottimo sistema di irrigidimento dei solai nel proprio piano. La solidarizzazione della soletta alle travi di legno consente di utilizzare solette di piccolo spessore ( $\sim 5$  cm)
- Un'altra tecnica per l'irrigidimento consiste nella realizzazione di una struttura reticolare in acciaio che può essere disposta fra il tavolato ed il pavimento oppure a vista all'intradosso del solaio



## IRRIGIDIMENTO SOLAI NEL PROPRIO PIANO

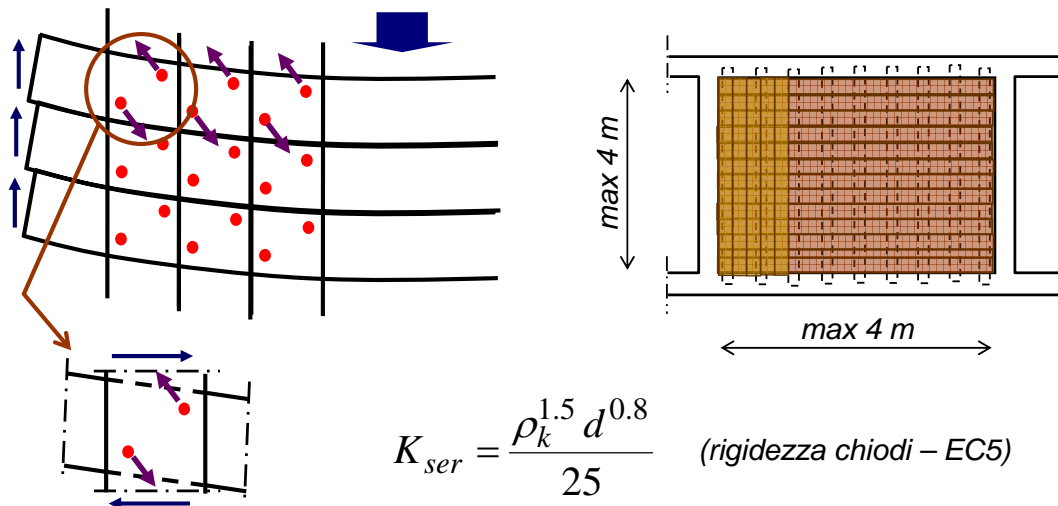


Le barre iniettate hanno il compito di contrastare gli spostamenti fuori piano della parete adiacente (*effetto tirante*) e di trasferire la forza di scorrimento tra solaio e parete (*effetto spinotto*)



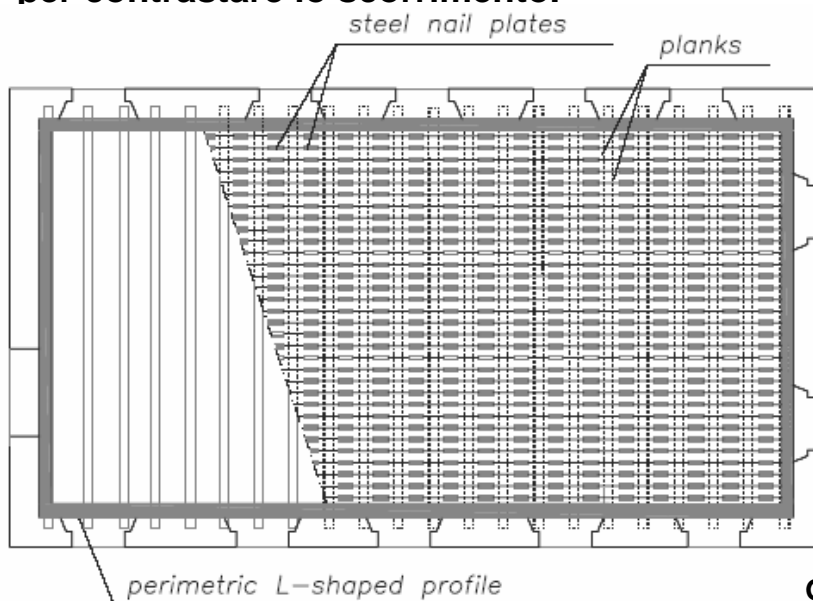
## IRRIGIDIMENTO SOLAI NEL PROPRIO PIANO

Se i campi di solaio sono di piccole dimensioni (*max 4 x 4 m*) può essere sufficiente irrigidire i solai inchiodando un secondo tavolato sopra il tavolato esistente disposto perpendicolarmente a quest'ultimo (o a 45°). E' indispensabile eseguire una robusta chiodatura che ha il compito di contrastare lo scorrimento longitudinale fra le tavole.



## IRRIGIDIMENTO SOLAI NEL PROPRIO PIANO

Una nuova tecnica "a secco" leggera prevede l'impiego di piastre chiodate che solidarizzano longitudinalmente le tavole dell'impalcato per contrastare lo scorrimento.

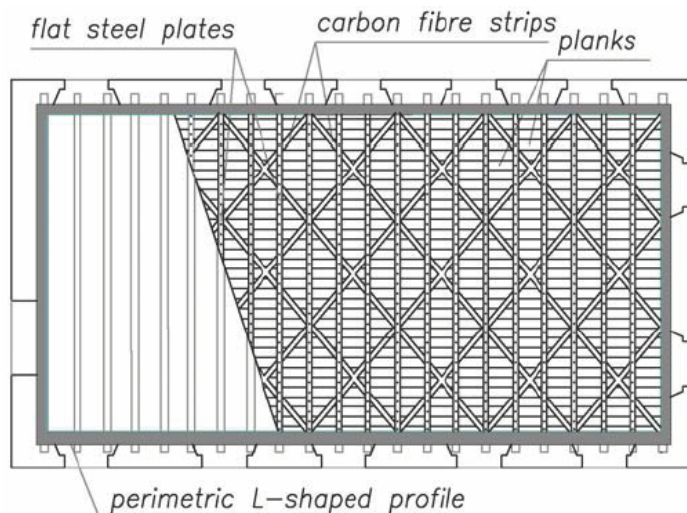






## IRRIGIDIMENTO SOLAI NEL PROPRIO PIANO

Un'altra tecnica consiste nell'uso di nastri diagonali in fibre di carbonio incollati alle tavole del solaio. Sul perimetro è sempre previsto un angolare metallico solidarizzato sia alle travi del solaio che alla muratura con spinotti iniettati.



## IRRIGIDIMENTO SOLAI NEL PROPRIO PIANO

Prove sperimentali su campioni di solaio reale (4.0x4.0 m).



**Campioni F1, F2**

Perni con gioco da 2 mm



**Campione F3**

Perni con foro calibrato



**Campione F4**

Perni con foro calibrato

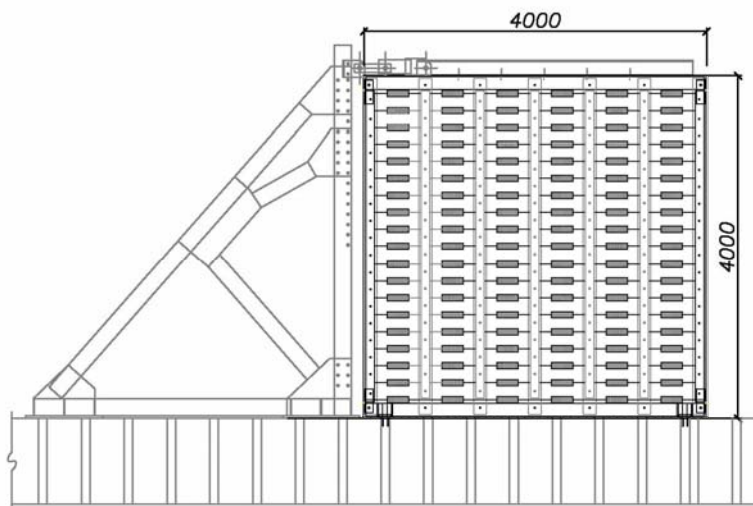




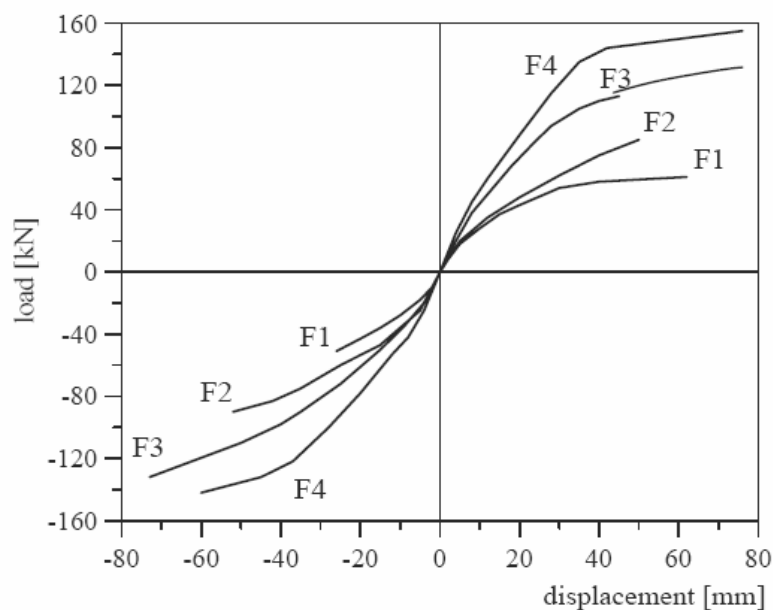
## INDAGINE SPERIMENTALE

Prove sperimentali su campione di solaio in scala 1:1 (dimensioni 4.0x4.0 m).

### Campione F1



## RISULTATI SPERIMENTALI







## RISULTATI SPERIMENTALI

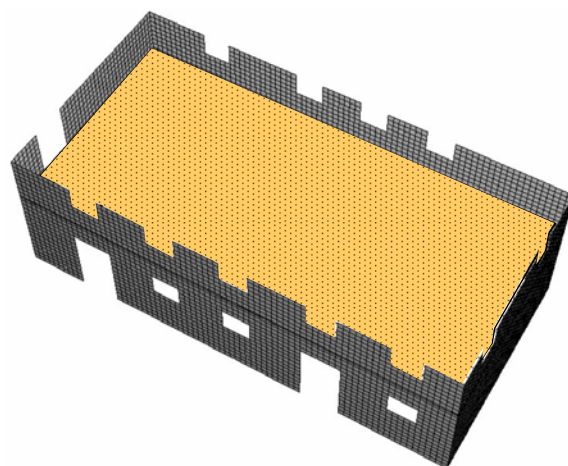
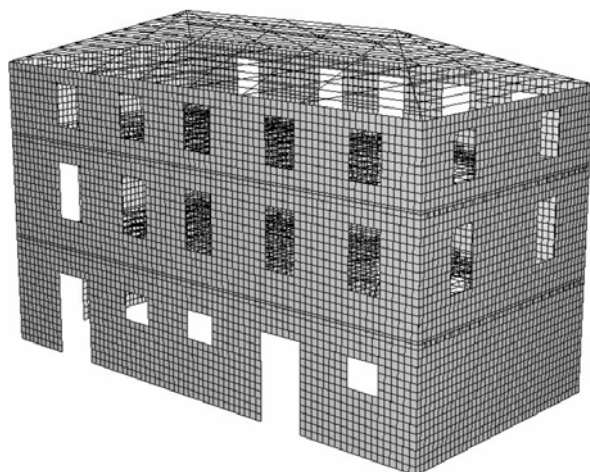
	Specimen	Stiffness	Max load	Max displacement
		(N/mm)	(kN)	(mm)
Piastre chiodate	F1	2505	60.7	65.40
	F2	2795	90.0	55.38
	F3	3420	130.0	101.34
CFRP nastri	F4	4160	156.7	94.27
	Non rinforzato	128	3.5	

Campione/nonrinf	Rapp. rigidezza	Rapp. resistenza
F2/Unstr.	22	26
F3/Unstr.	27	37
F4/Unstr.	33	45



## COMPORTAMENTO GLOBALE

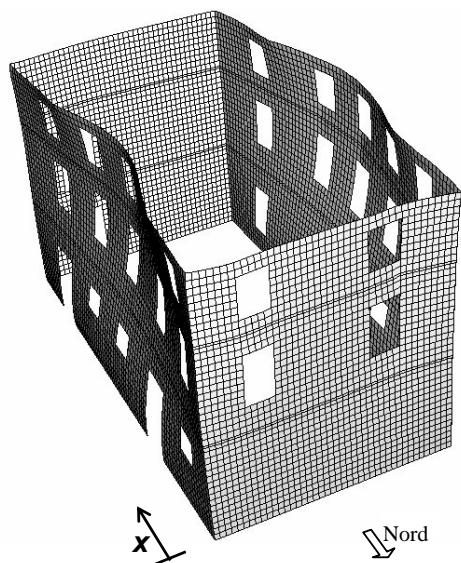
E' stata eseguita una simulazione numerica del comportamento di un edificio storico in muratura con solai lignei originali e rinforzati con la tecnica del campione F3. Sono stati messi a confronto i risultati.



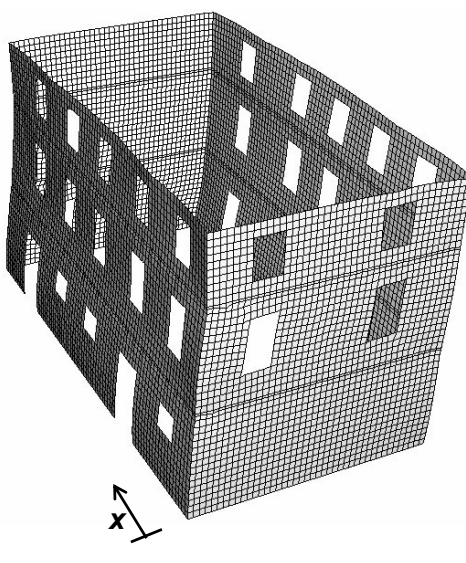


## COMPORTAMENTO GLOBALE - CONFRONTO

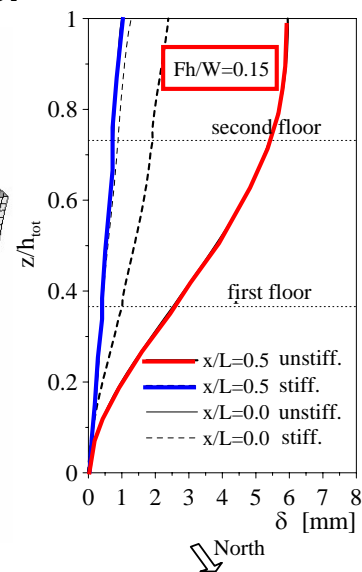
Spostamenti orizzontali ai vari piani del fabbricato.



Solai originali

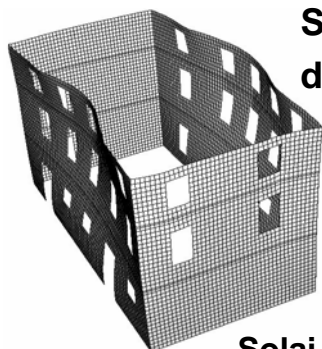


Solai rinforzati

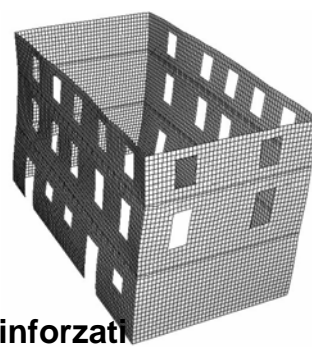
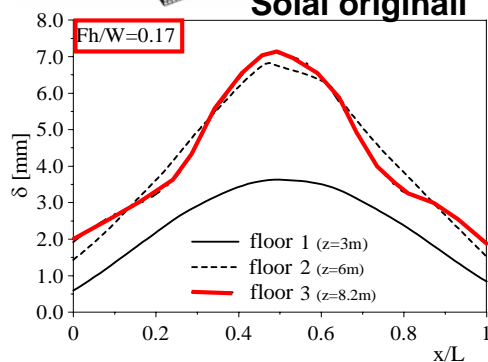


## COMPORTAMENTO GLOBALE - CONFRONTO

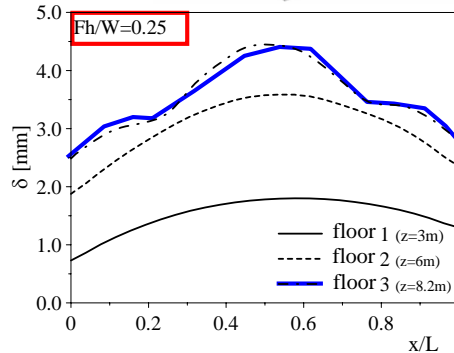
Spostamenti fuori piano  
della parete longitudinale



Solai originali



Solai rinforzati





## **CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE**

- **Gli edifici storici in muratura richiedono frequentemente interventi di rinforzo strutturale affinché possano continuare ad ospitare le attività in essi collocate.**
- **Gli interventi sono resi necessari: da problemi di malfunzionamento della struttura conseguente a vizi costruttivi, dal degrado delle caratteristiche dei materiali per l'attacco di agenti aggressivi e dall'aumento delle sollecitazioni (azioni).**
- **Le tecniche di intervento devono essere rispettose delle regole della conservazione (reversibilità, bassa invasività).**
- **Negli ultimi due decenni è stata dedicata molta attenzione al problema del recupero strutturale e sono stati sviluppati materiali e tecniche innovative per gli interventi.**

