

## PIANO DI RICOSTRUZIONE

### COMUNE DI CARAPELLE CALVISIO

L. 77/2009 art. 14 c.5 bis

*Decreto del Commissario Delegato per la Ricostruzione n.3 del 9 Marzo 2010*

Responsabile per l'attuazione:  
SINDACO DI CARAPELLE CALVISIO  
*Domenico Di Cesare*

Segretario comunale:  
*Dott. Ottavio Caleo*

Responsabile Unico del Procedimento:  
Ufficio Tecnico Comunitario  
*Ing. Sergio Sulpizii*

Collaboratori dell'Ufficio Tecnico:  
*Dott.ssa Barbara Volpe*  
*Geom. Luigi Martinico*  
*Dott. Giuseppe Chiaravalle*

## Relazione tecnica

RT  
5

### GRUPPO di PROGETTAZIONE

Coordinamento generale:  
*Arch. Andrea Taddei*

Consulenza scientifica:  
*Ing. Luca Iagnemma*

Caratteri economici:  
*Dott. Rodolfo Berardi*

Caratteri normativi:  
*Avv. Gaetano Maria Isidori*

Caratteri geologici e geomorfologici:  
*Geol. Silvio Tatoni*

### COLLABORAZIONI

Analisi urbanistica e sistema cartografico:  
*Ing. Federica Pignatelli*  
*Ing. Xiana Vázquez Do Campo*

Analisi architettonica e del patrimonio  
storico-culturale:  
*Arch. Giulia Rosaria Taraschi*  
*Ing. Francesca Molino*

Analisi strutturale:  
*Ing. Andrea Presenza*  
*Ing. Raffaele Pio Fidanza*  
*Ing. Vincenzo Durantini*  
*Ing. Elena Santini*

*Ing. Emiliano Di Luigi*  
*Ing. Anna Di Febbo*

Assistenza Cad:  
*stud. Debora Polidoro*

PdRCC



**Indice**

<b>DESCRIZIONE INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO .....</b>	<b>2</b>
Interventi sulla muratura: .....	3
Interventi su orizzontamenti.....	10
Interventi in fondazione .....	14
Ripristino consistenza e continuit� delle murature .....	16
Interventi di miglioramento:.....	19
 <b>INDICAZIONI SUI MATERIALI E SULLE TECNICHE COSTRUTTIVE .....</b>	<b>20</b>
Premessa .....	20
L'evoluzione delle tecniche costruttive .....	21
Malte per muratura .....	22
Elementi resistenti in muratura .....	23
Parametri meccanici della muratura .....	30
Ruolo dell'immorsatura fra muri trasversali e facciate .....	31
 <b>MAPPATURA DELLE VULNERABILIT� RICORRENTI .....</b>	<b>32</b>
Considerazioni generali .....	32
Lo studio del comportamento sismico degli edifici in muratura.....	34
Corrispondenze fra edifici diversi.....	36
L' aggregato strutturale.....	37
L'analisi sismica dell'edificio ordinario. ....	37
Azioni.....	39
Comportamento della fascia di piano delle pareti per azioni sismiche.....	50
Comportamento delle pareti fuori dal piano.....	53
 <b>INDICAZIONE SULLA VULNERABILIT� DEGLI EDIFICI.....</b>	<b>58</b>
 <b>INDICAZIONE PER LA PREVENZIONE E LA RIDUZIONE DEI RISCHI</b>	
<b>IDROGEOLOGICI E GEOTECNICI .....</b>	<b>61</b>
Rischio idrogeologico .....	61
Rischio geotecnico .....	62

## DESCRIZIONE INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO

Il borgo storico di Carapelle Calvisio è quasi totalmente realizzato in muratura portante e, di conseguenza, descriveremo in generale gli interventi su una struttura di un edificio in muratura.

Gli interventi possono essere:

di riparazione: servono ad eliminare i dissesti subiti dall'edificio o parte di esso a seguito di aventi dannosi, riportando gli elementi strutturali allo stesso livello di sicurezza che avevano prima.

Di consolidamento: servono ad eliminare i dissesti subiti fornendo nel contempo all'elemento strutturale o all'edificio un livello di resistenza superiore a quello che avevano prima.

Di rinforzo: servono a fornire all'edificio o parte di esso ulteriore e sufficiente resistenza rispetto ad azioni diverse da quelle per le quali erano progettati o costruiti.

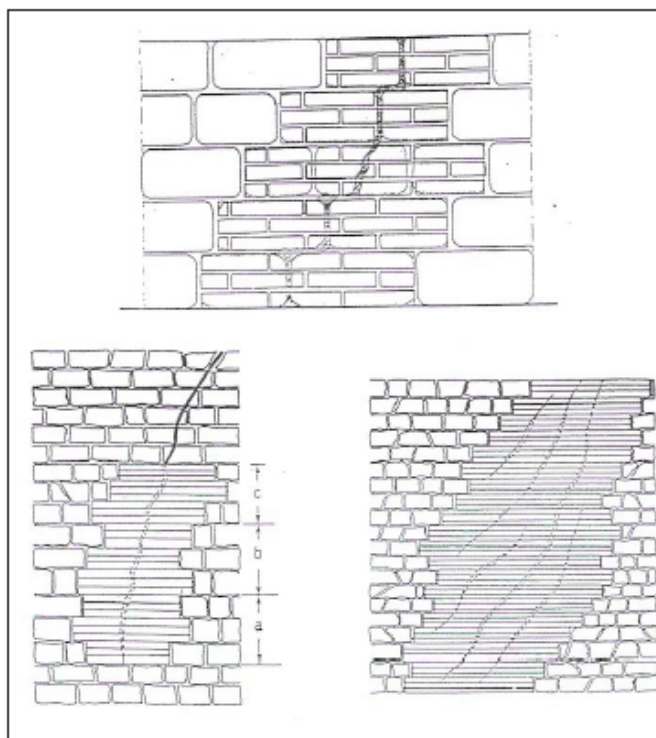
In relazione alla tipologia degli elementi strutturali abbiamo la seguente classificazione:

- interventi sulle murature
- interventi sugli orizzontamenti (solai, volte, archi)
- interventi sulle fondazioni
- Nell'ambito di queste categorie sono anche compresi gli interventi specifici per il miglioramento e l'adeguamento sismico.
- Gli interventi sugli edifici in muratura in zona sismica sono:
- incremento della resistenza delle pareti murari (maschi e fasce) e della muratura in genere

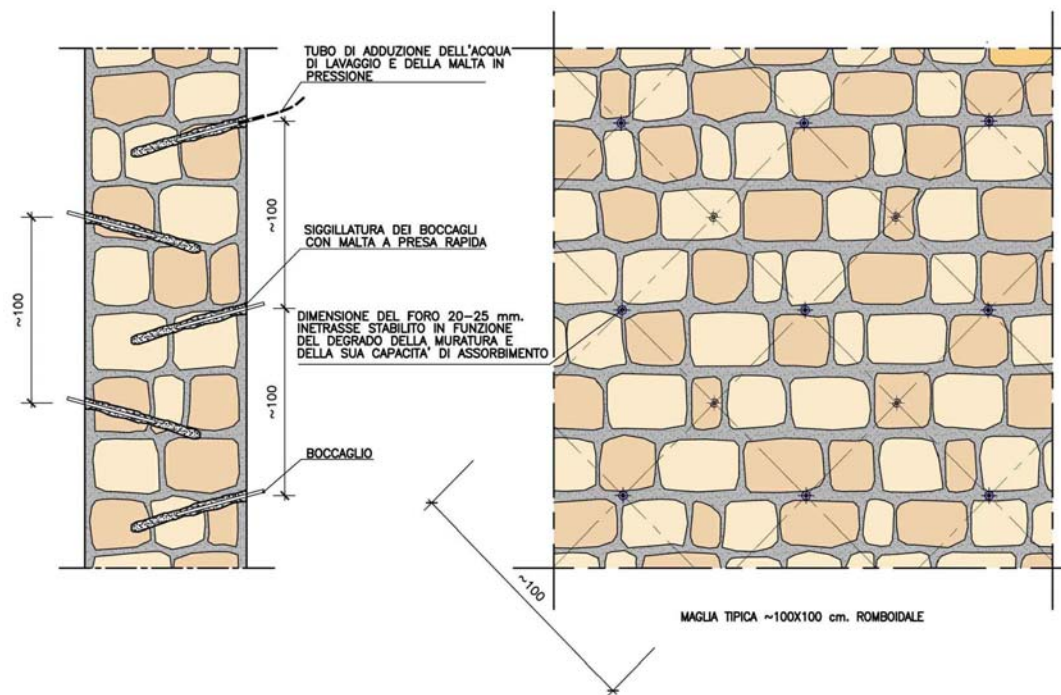
- incremento dell'efficacia dei collegamenti, creazione di nuovi collegamenti, incremento della rigidezza dei solai nel piano orizzontale
- eliminazione e riduzione delle spinte
- interventi sulle coperture spingenti o scollegate
- interventi in fondazione di collegamento e/o di incremento della capacità portante
- interventi di modifica del complesso strutturale atti a migliorarne la risposta (es. variazione della distribuzione degli elementi resistenti verticali o aggiunta di nuovi, separazione di parti della struttura mediante giunti, riduzione delle masse, trasformazione di elementi non strutturali in strutturali etc.)
- interventi di demolizione e ricostruzione parziale o totale

***Interventi sulla muratura:***

- cucì e scucì
- iniezioni non armate
- iniezioni armate
- rinforzo con paretine in c.a.
- sarcitura di lesioni
- cuciture di martelli e cantonali
- confinamento
- piattabande
- ammorsamento

**Consolidamento per sostituzione: cucì e scuci**

Consolidamento con iniezioni di malta: iniezioni non armate

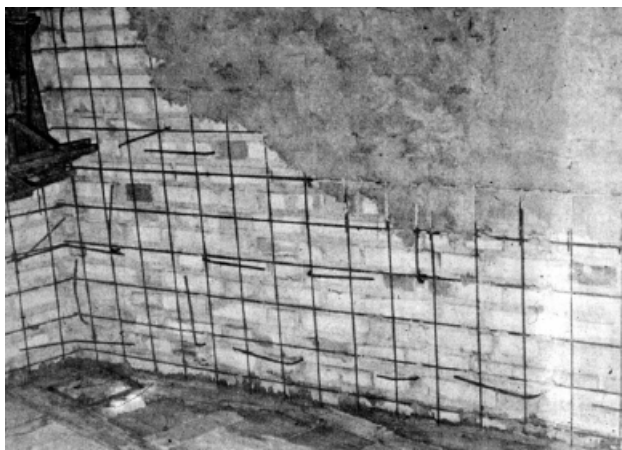


Consolidamento con barre metalliche ed iniezioni in pressione: iniezioni armate





*Fasciatura dei maschi murari*



*Cucitura di un cantonale*



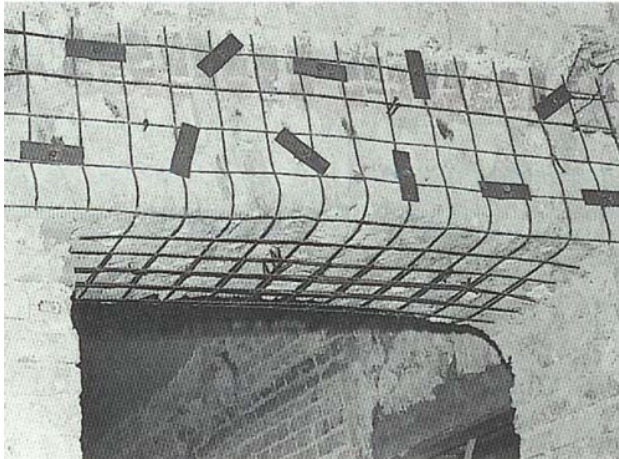
Confinamento



Creazione o rifazione di piattabande







### **Consolidamenti con resine e materiali compositi (FRP)**

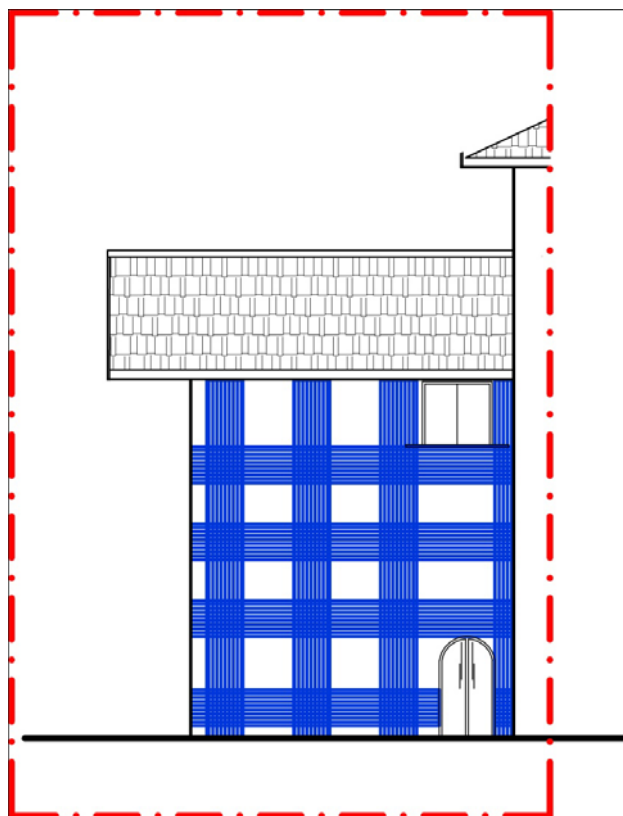
#### Vantaggi:

- spessori estremamente contenuti
- assenza di ritiro
- elevate caratteristiche meccaniche
- ampia varietà di prestazioni
- facilità di posa in opera
- capacità di riempire lesioni microscopiche
- indurimento molto rapido
- ottima aderenza alle superfici murarie
- eccellente resistenza alla corrosione

#### Svantaggi:

- costo elevato
- scorrimenti viscosi elevati , soprattutto nelle resine pure
- infiammabilità e scarse resistenze alle alte temperature
- comportamento fragile
- elevata sensibilità a fenomeni di invecchiamento con perdita di aderenza
- resistenze modeste quando usate con inerti
- modulo elastico di valore basso
- necessità di manodopera specializzata
- applicazione non reversibile

*Il rinforzo delle murature con compositi fibrorinforzati consente di dotare le murature di notevole resistenza al taglio ed alla flessione derivanti dal sisma.*



### Fasi di esecuzione

- esecuzione di perforazioni orizzontali X attraverso lo spessore delle murature secondo una maglia di X cm di lato e nelle posizioni previste per l'applicazione dei tessuti, con spigoli dei fori arrotondati con raggio di X mm, e pulitura delle perforazioni con aspirazioni d'aria;
- inserimento nelle perforazioni con aspirazione d'aria;
- inserimento nelle perforazioni di fiocchi realizzati con corde di tessuto di acciaio o altro materiale ad elevate prestazioni meccaniche e intasamento con resine epossidiche fluide e sfiocatura delle loro estremità;
- applicazione della rete tramite eventuale primer e fissaggio della sfiocatura del cordino e dei tessuti con resine epossidiche;
- applicazione di resina finale;

### Nei casi di piegatura dei tessuti in angoli concavi:

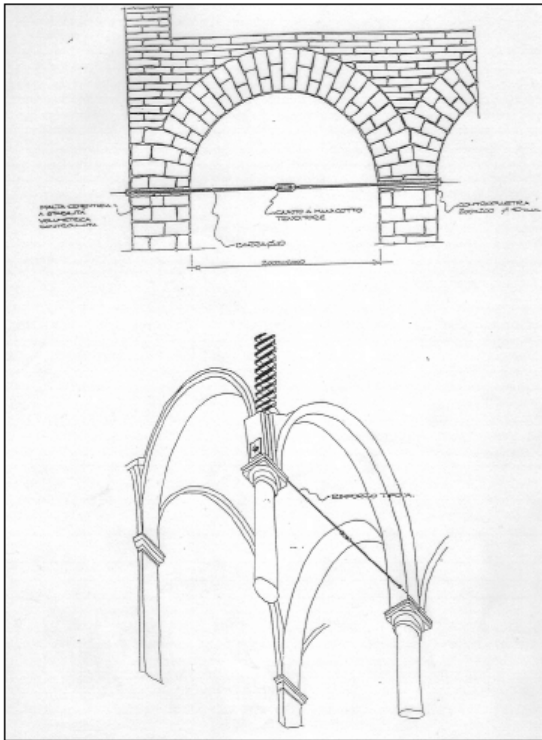
- esecuzione di perforazioni orizzontali X attraverso il tessuto già applicato e lo spessore delle murature ad interasse di 30 cm, con spigoli dei fori arrotondati con raggio di 20 mm, e pulitura delle perforazioni con aspirazione d'aria;
- inserimento nelle perforazioni di fiocchi realizzati con corde di tessuto di acciaio ad elevate prestazioni meccaniche;
- intasamento con resine epossidiche fluide e sfiocatura delle loro estremità e fissaggio con resine delle fibre sui tessuti applicati.

## ***Interventi su orizzontamenti***

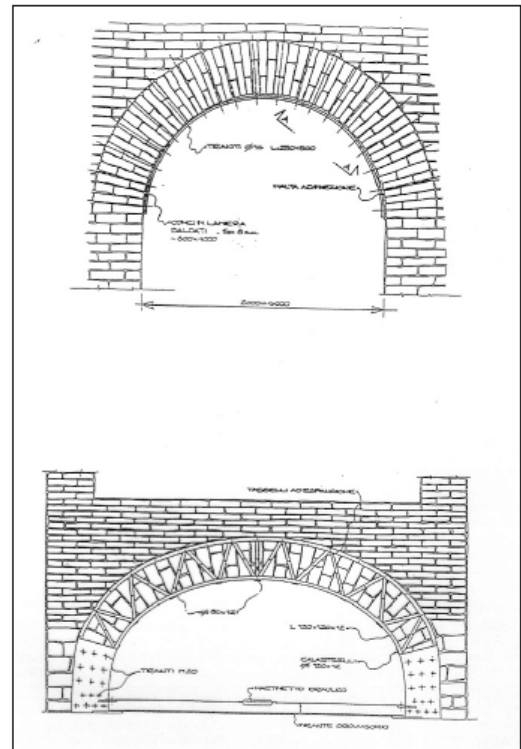
### **Archi e volte:**

- interventi locali con "cuci a scuci";
- resine epossidiche per piccole fessure (1 + 2 mm);
- malta espansiva iniettata a pressione per fessure più grandi {2 + 4 cm};
- rinforzo con barre metalliche;
- consolidamento con cappa in c.a. eventualmente spruzzata ("spritz beton") armata con rete elettrosaldata
- eliminazione della spinta a mezzo di catene metalliche;
- alleggerimento dei rinfianchi con costruzione di rinfianchi cellulari;
- svuotamento della volta con costruzione di un nuovo solaio;
- sospensione a strutture soprastanti;
- fasciatura dell'arco a mezzo struttura reticolare metallica;

*l'assorbimento delle spinte con catene interne  
acciaio*



*fasciature con sistemi reticolari in*



### **Interventi su solai in legno:**

caratteristiche tipiche di dissesto:

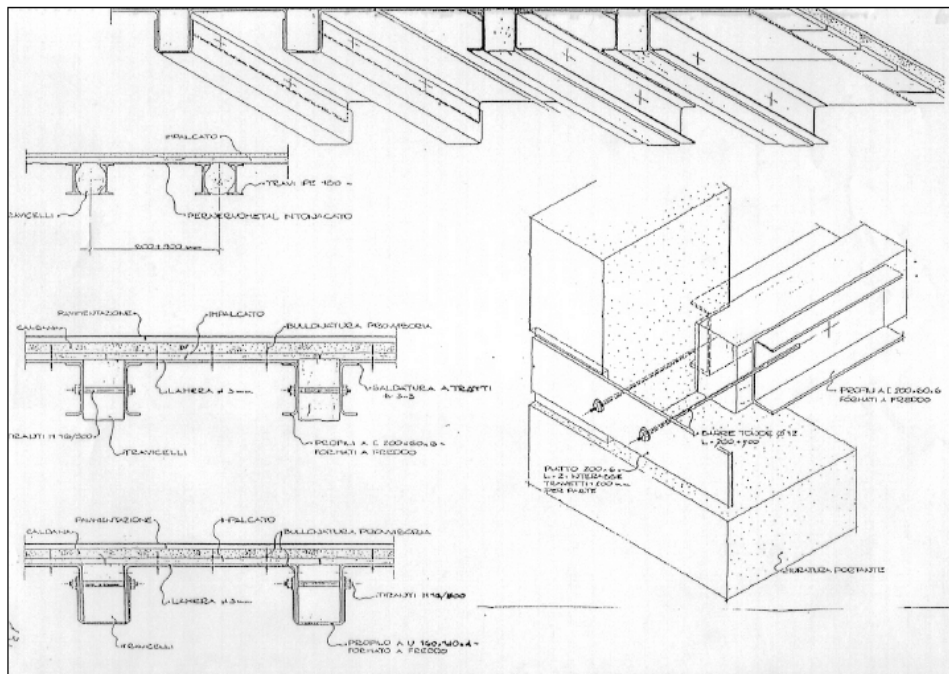
- rilevanti deformazioni viscosse della struttura principale e di quella secondaria, che costringe all'impiego di pesanti strati di riempimento (caldane);
- elevato rischio di degrado biologico per effetto dell'umidità, microorganismi, ..etc.;

- degrado delle condizioni di vincolo dovuto alle vibrazioni e alla putrefazione delle testate delle travi lignee;
- perdita di connessione tra le travi e gli strati di riempimento;
- eccesso di deformabilità;
- fessurazione longitudinale delle travi:
- fessurazione nel piano del solaio in direzione parallela alle travi per mancanza di rigidità in direzione trasversale;
- dissesto delle selle di appoggio nei muri portanti a causa dello scarico concentrato del solaio

*Pratica corrente:*

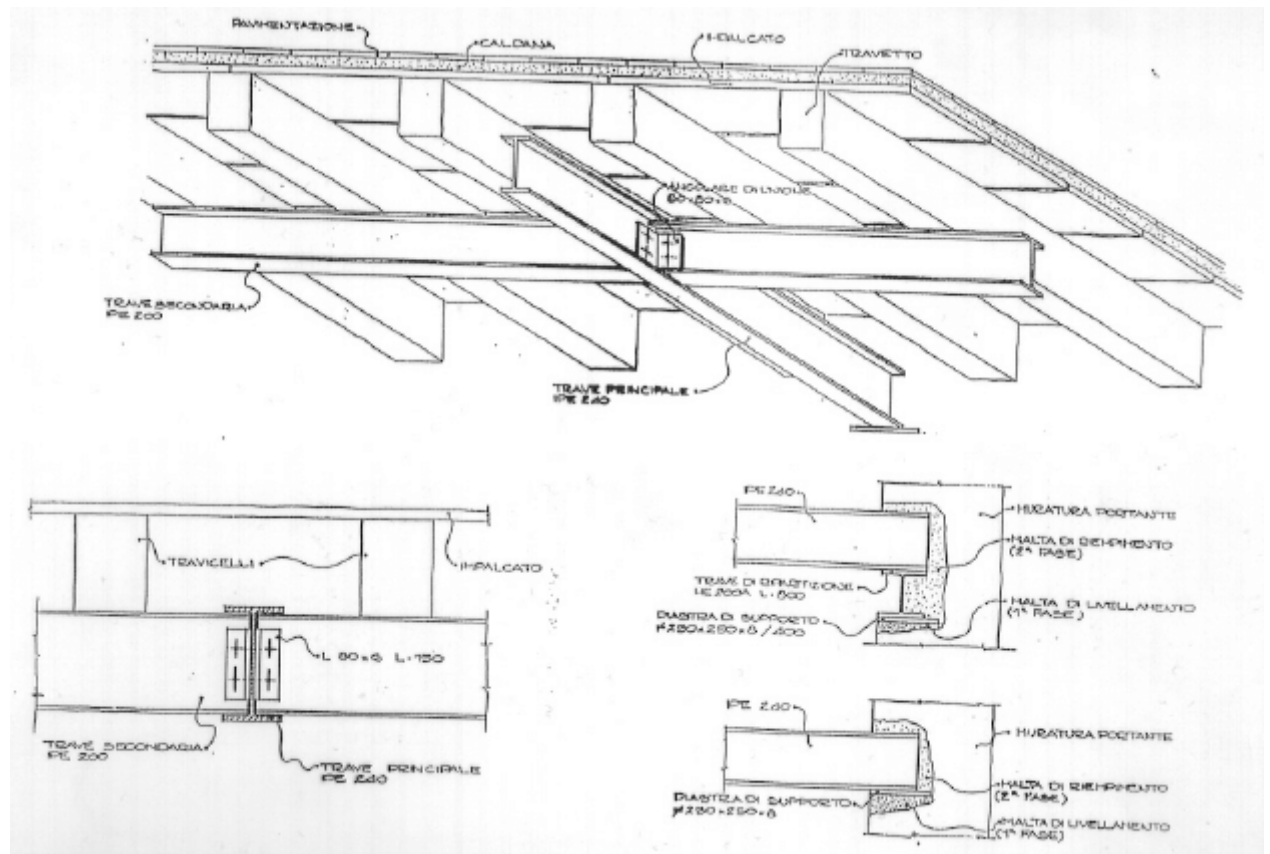
- accoppiamento delle travi lignee con di profili metallici;
- inserimento di profili metallici con la funzione di costituire una struttura mista;
- introduzione di una o più travi trasversali al di sotto dei solai con funzione di rompitratta;
- irrigidimento del tavolato mediante elementi lignei o metallici;
- aggiunta di chiavarde, piatti e angolari metallici per interventi localizzati;
- interventi con resine epossidiche.

*accoppiamento di profili in acciaio alle travi lignee*



*consolidamento intradossale con travi in acciaio trasversali a singola o doppia orditura*





### Solai in acciaio:

caratteristiche tipiche di dissesto:

- degrado delle travi metalliche dovute a corrosione;
- degrado delle condizioni di vincolo dovute a vibrazioni e a carichi ripetuti;
- perdita di connessione tra le travi e gli strati di riempimento;
- eccesso di deformabilità;
- fessurazione nel piano dal solaio in direzione parallela alle travi per mancanza di rigidità in direzione trasversale;
- dissesto delle selle di appoggio ai muri portanti a cause dallo scarico concentrato del solaio

*pratica corrente:*

- inserimento di elementi aggiuntivi saldati allo scopo di incrementare la sezione resistente delle travi;
- introduzione di una o più travi trasversali al di sotto dei solai con funzione di rompitratta;
- getto di una soletta integrativa in c.a. armata con rete elettrosaldata;

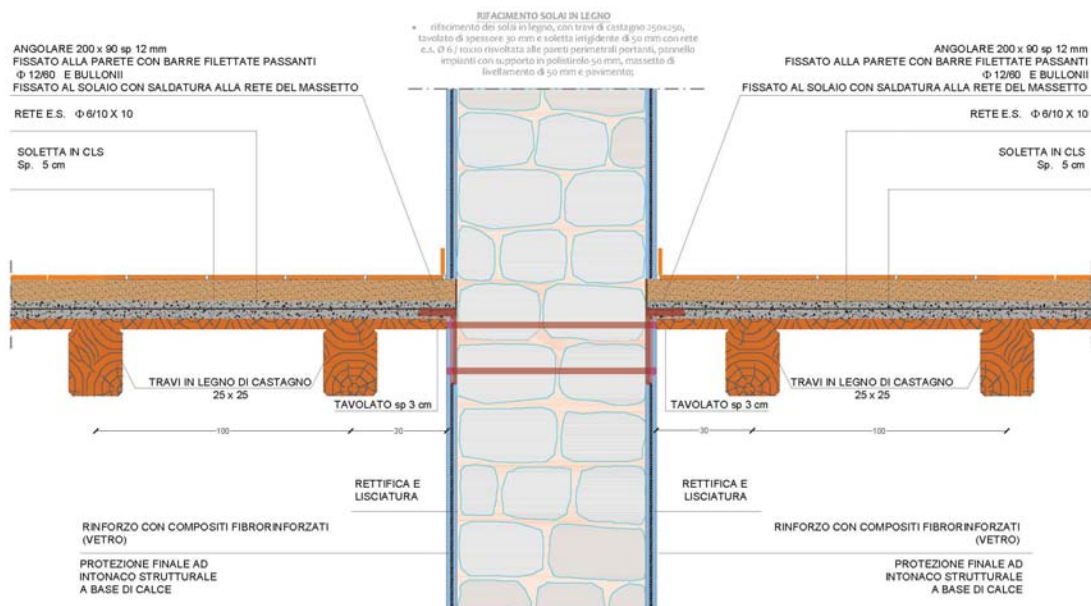
Solai in c.a. :

caratteristiche tipiche di dissesto:

- degrado chimico del conglomerato;
- corrosione delle armature;
- espulsione del copriferro;
- fessurazioni nel piano del solaio in direzione parallela ai travetti;
- eccesso di deformabilità.

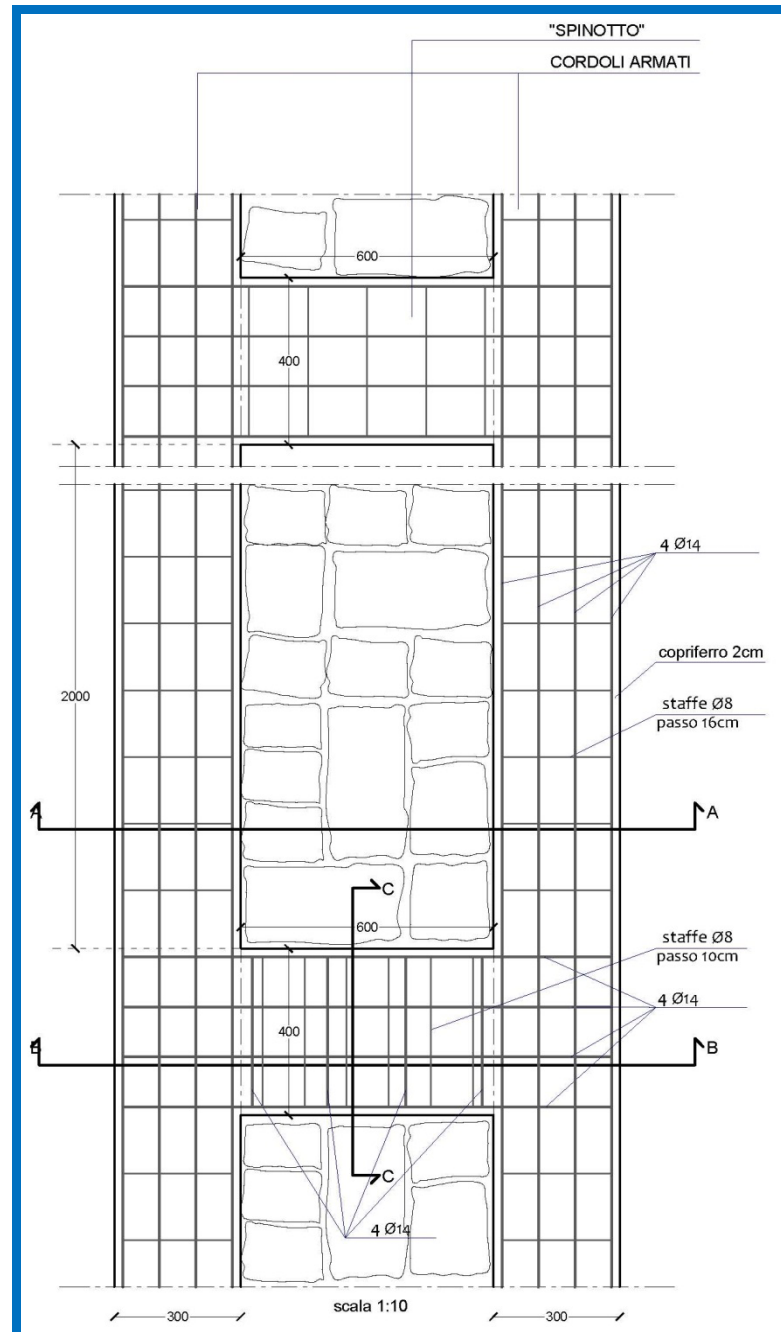
*pratica corrente:*

- impiego di resine per la sigillatura delle lesioni;
- sostituzione del copriferro;
- getto di una soletta estradossale integrativa;
- placcaggio con elementi metallici

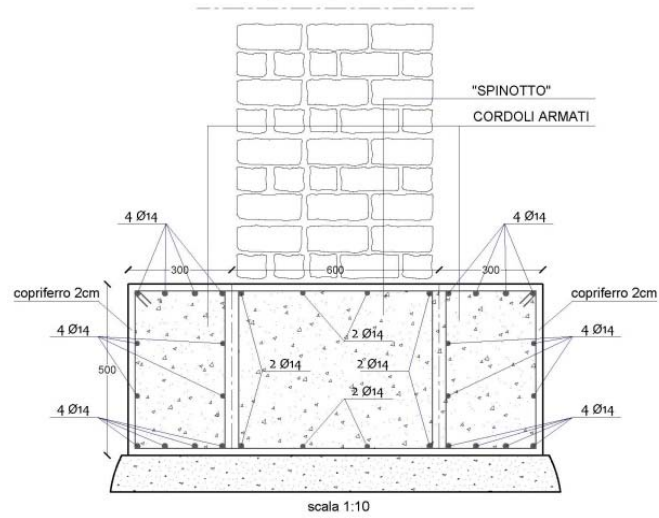
Ricostruzione di solai in legno

## ***Interventi in fondazione***

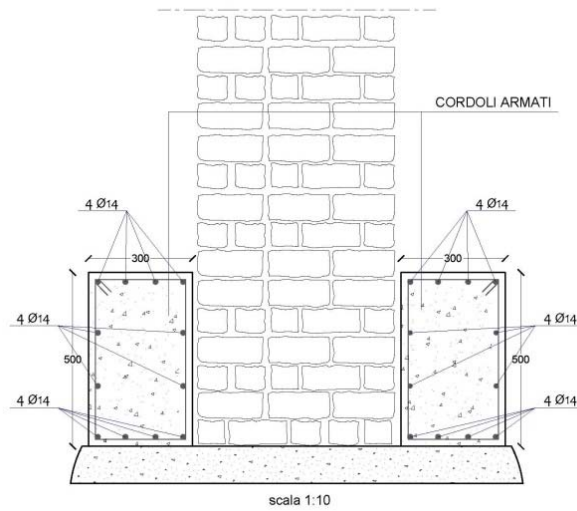
Allargamento della base fondale al fine di meglio distribuire i carichi verticali della struttura in muratura al terreno.



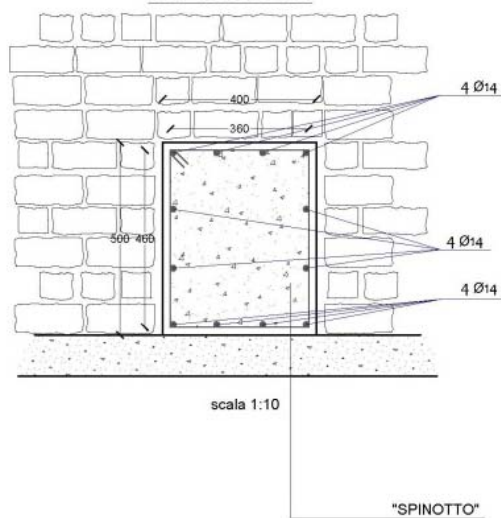
**SEZIONE BB**



**SEZIONE AA**



**SEZIONE CC**





## ***Ripristino consistenza e continuit  delle murature***

*Tale operazione consente di ripristinare e migliorare la qualit  della muratura, eliminando le lesioni e i vuoti o carenze di malta e le mutue ammorsature agli angoli e incroci*

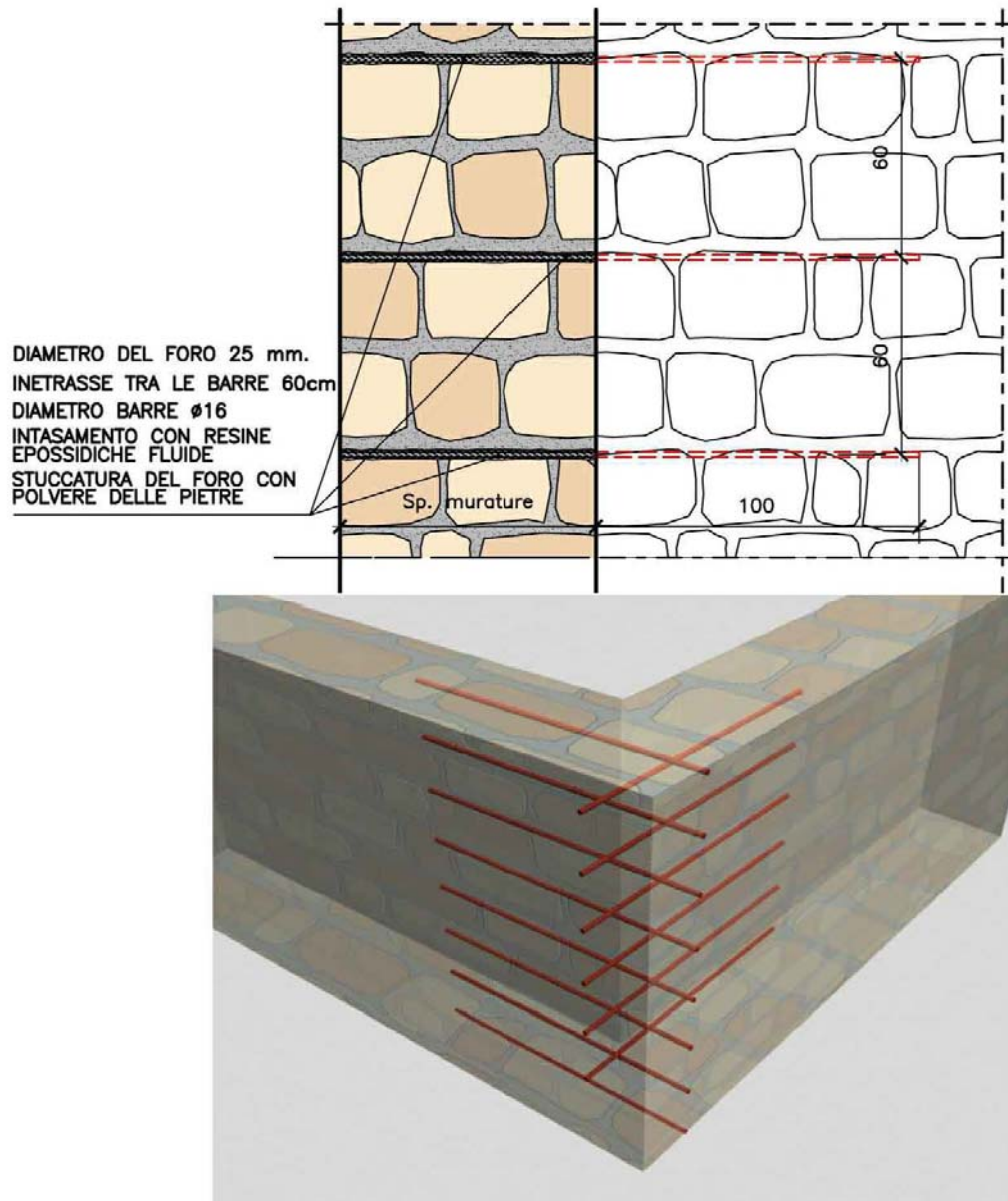
### **Fasi di esecuzione**

#### **1.1. Consolidamento delle muratura**

- Esecuzione di perforazioni  $\varnothing 20$  per i 2/3 delle murature nei giunti degli elementi da entrambi i lati della muratura per le successiva iniezioni di malta con maglie romboidali  $\sim 100 \times 100$  cm. sfalsati;
- Pulitura delle superfici delle murature con spazzolature e lavaggio con acqua e pressione;
- stuccatura delle lesioni e rettifica delle superfici con strato di malta strutturale a base di calce, lasciando i boccagli per l'iniezione lungo le lesioni e nei fori;
- Lavaggi ripetuti delle perforazioni con acqua a bassa pressione fino alla totale saturazione della muratura;
  - Iniezioni a pressione dai boccagli con boiacca strutturale a base di calce priva di cemento, iniziando dal basso e procedendo verso l'alto, contemporaneamente su tutte le murature (la singola iniezione andr  terminata alla fuoriuscita della malta dal boccaglio superiore); rimozione del boccaglio di iniezione e sigillatura del foro .

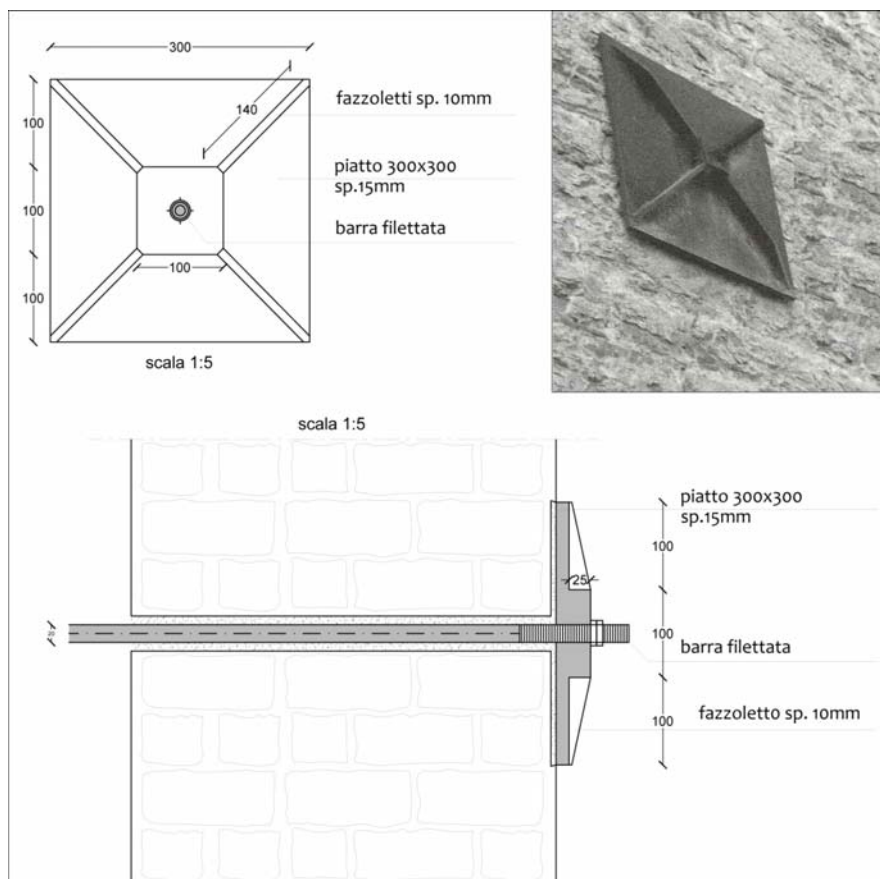
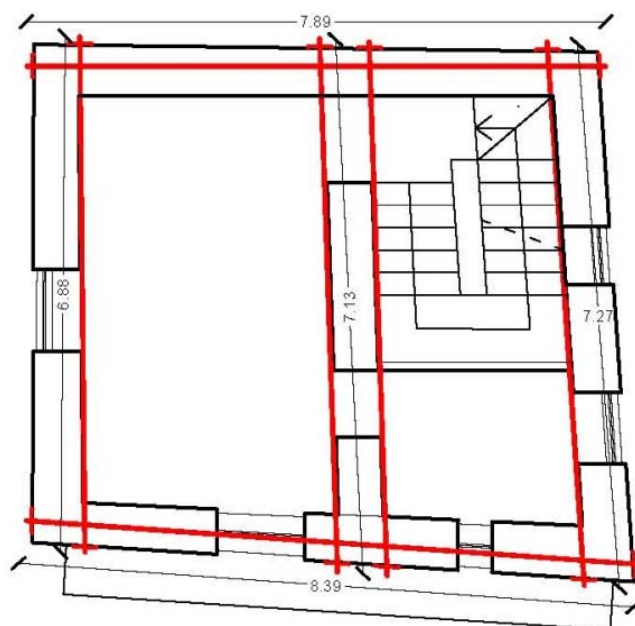
#### **1.2. Ammorsamento della muratura**

- esecuzione di perforazioni  $\varnothing 25$  in mezzeria dello spessore delle murature e nel loro piano agli angoli e negli incroci e di lunghezza tale da penetrare per almeno 1m nella muratura da ammorsare, ad interasse di 60 cm lungo la verticale;
- pulitura delle perforazioni con aspirazione d'aria;
- inserimento di barre  $\varnothing 16$  di armatura e intasamento con resine epossidiche fluide.



*Inserimento di catene in tondo in acciaio con capochiave formato da piastre d'acciaio quadrate nervate sulle diagonali:*

- sono disposte nelle due direzioni principali: connessione tra le murature ortogonali
- Sono un vincolo contro il ribaltamento fuori piano
- sono un efficace collegamento tra le strutture portanti in corrispondenza dei solai
- favoriscono il funzionamento monolitico del complesso edilizio



### ***Interventi di miglioramento:***

L'edificio deve comportarsi come una struttura spaziale assumendo un comportamento scatolare ossia in cui gli elementi resistenti verticali (pareti) risultano ben collegati tra loro; per una efficace ripartizione delle azioni orizzontali dovute al sisma ondulatorio è necessario che i solai risultino ben collegati alle pareti portanti ed abbiano un'adeguata rigidezza nel proprio piano.

sono ipotizzabili pertanto i seguenti interventi tesi a riportare edifici di I e II classe ad edifici di III classe:

- inserimento di catene per il collegamento delle pareti;
- inserimento di cordoli orizzontali a livello di solaio;
- irrigidimento del solaio nel proprio piano
- collegamento dei solai alle pareti;
- rinforzi delle fasce di piano

e' inoltre necessario eliminare, o almeno ridurre le spinte che elementi, come gli archi e le volte, riportano sulle murature portanti:

- *sono disposte nelle due direzioni principali: connessione tra le murature ortogonali*
- *Sono un vincolo contro il ribaltamento fuori piano*
- *sono un efficace collegamento tra le strutture portanti in corrispondenza dei solai*
- *favoriscono il funzionamento monolitico del complesso edilizio*

#### **Bibliografia di riferimento**

*"Edifici in muratura alla luce della nuova normativa sismica" di Pietro Lenza e Aurelio Gherzi*

*"Edifici in muratura Progettazione degli interventi post-sisma" di A.Lemme, A.Martinelli, S.Podestà*



## **INDICAZIONI SUI MATERIALI E SULLE TECNICHE COSTRUTTIVE**

### ***Premessa***

Il centro storico di Carapelle Calvisio è caratterizzato da costruzioni con struttura portante in muratura tipica, costituita da conci sbozzati legati tra di loro da malte.

Questo tipo di muratura viene considerato dalle attuali norme sismiche (N.T.C. 2008) come la più svantaggiata in termini di resistenze caratteristiche.

In questo caso infatti è di fondamentale importanza il "legante" dei conci, cioè la malta utilizzata per rendere la muratura compatta e con comportamento monolitico.

Gli orizzontamenti sono costituiti principalmente da volte, gli architravi in lastre di pietra naturale o volte.

L'attuale normativa prescrive che gli interventi da effettuare sugli edifici esistenti in muratura (vedi cap. 8 N.T.C. 2008 e relativo decreto di attuazione) garantiscano un miglioramento rispetto al comportamento antisismico dell'edificio nelle condizioni attuali.

Si riportano di seguito alcune considerazioni fondamentali per una corretta analisi dello stato di fatto del patrimonio abitativo e per una corretta programmazione dei futuri interventi

### ***fabbricati in muratura del centro storico***



## ***L'evoluzione delle tecniche costruttive***

L'evoluzione delle tecniche costruttive nel tempo ha determinato il configurarsi di diverse ti-pologie che possono considerarsi tipiche di un ben determinato periodo storico (Fiengo, Guer-riero 1999).

La tipologia “a cantieri” (tipica dei secoli XVI e XVII) è costituita da pietrame di tufo tessuto in maniera irregolare e legato da malta di calce e pozzolana. Il corso della muratura veniva rego-larizzato o, per meglio dire, ripianato con malta alla fine della giornata lavorativa, caratterizzan-do l'aspetto del paramento murario con intervalli regolari dei successivi “cantieri”. Sotto il pro-filo meccanico la muratura a cantieri si caratterizza per una consistente percentuale della malta rispetto ai conci lapidei.

La tipologia “a bozzette” (tipica del XVIII secolo) è costituita da filari piuttosto regolari di blocchetti di tufo sommariamente squadriati in cantiere. Lo spessore del paramento murario si otteneva con la realizzazione di più filari paralleli, non sempre adeguatamente collegati da dia-toni. La percentuale di malta, per unità di volume della muratura, diminuisce sensibilmente.

La tipologia “a sacco” (tipica del XIX secolo) è costituita da due paramenti esterni realizzati con conci di tufo regolarizzati quasi esclusivamente sulle facce esterne; essi confinano uno spa-zio interno riempito da materiale appena impastato, costituito da scaglie di tufo e materiale di ri-sulta. Mancano efficaci collegamenti tra i due paramenti e sono al più presenti diatoni che anco-rano il paramento stesso al cuore morbido della muratura. Nella muratura a sacco la malta ritorna ad aumentare ma con forte disuniformità derivante dalla disomogeneità del sistema co-struttivo.

Le murature contemporanee (qui definite “ordinarie”) sono caratterizzate da conci di tufo che, prodotti industrialmente dalle cave (a partire dalla metà del XX secolo), si presentano di forma regolare ben squadrata con dimensioni standard, consentendo quindi un agevole conseguimento di tessiture compatte. Alla malta di calce area si è sostituita la malta cementizia o bastarda.

- miglioramento della qualità della muratura ottenuta attraverso l'integrazione dei giunti di malta lacunosi e mediante percolazione delle creste murarie.

### ***Malte per muratura***

La malta da muratura deve garantire prestazioni adeguate al suo impiego in termini di durabilità e di prestazioni meccaniche.

Per garantire durabilità è necessario che i componenti la miscela non contengano sostanze organiche o grassi o terrose o argillose. Le calce aeree e le pozzolane devono possedere le caratteristiche tecniche ed i requisiti previsti dalle vigenti norme.

Le prestazioni meccaniche di una malta sono definite mediante la sua resistenza media a compressione  $f_m$ .

Per l'impiego in muratura portante non è ammesso l'impiego di malte con resistenza  $f_m < 2,5 \text{ N/mm}^2$ .

La categoria di una malta è definita da una sigla costituita dalla lettera **M** seguita da un numero che indica la resistenza  $f_m$  espressa in  $\text{N/mm}^2$ .

Questo costituente delle strutture murarie è una miscela di un legante con sabbia ed acqua. Le norme tecniche specificano una serie di prescrizioni in merito alla composizione delle malte quali leganti delle murature.

In base al tipo di legante utilizzato la malta si definisce:

- Aerea, se il legante è calce idrata (o aerea)
- Idraulica, se il legante è calce idraulica
- Cementizia, se il legante è cemento
- Bastarda (o composta), se insieme al cemento è presente un altro legante
- Pozzolanica

Per quanto riguarda le caratteristiche di resistenza delle malte hanno dimostrato che esistono notevoli differenze tra i valori ottenuti attraverso le prove di compressione effettuate su provini di malta (cubici o prismatici) e i valori determinati mediante prove di compressione del giunto inserito nella muratura. I motivi di tale divario dipendono, oltre che dalla diversa geometria del provino e del giunto, anche dalla differente quantità di acqua presente nella fase di maturazione che, nel caso dei giunti in opera, subisce una notevole riduzione a causa dell'assorbimento compiuto dagli elementi lapidei.

## ***Elementi resistenti in muratura***

### **Elementi artificiali**

Per gli elementi resistenti artificiali da impiegare con funzione resistente possono essere in laterizio o calcestruzzo. Gli elementi resistenti artificiali possono essere dotati di fori in direzione normale al piano di posa (foratura verticale) oppure in direzione parallela (foratura orizzontale).

Per l'impiego nelle opere trattate dalle normative, gli elementi a foratura verticale sono classificati in base alla percentuale di foratura  $f$  ed all'area media della sezione normale di ogni singolo foro  $f$ .

I fori sono di regola distribuiti pressoché uniformemente sulla faccia dell'elemento.

La percentuale di foratura è espressa dalla relazione  $f = 100 F/A$  dove:

$F$  è l'area complessiva dei fori passanti e profondi non passanti;

$A$  è l'area lorda della faccia dell'elemento di muratura delimitata dal suo perimetro.

### **Elementi naturali**

Gli elementi naturali sono ricavati da materiale lapideo non friabile o sfaldabile, e resistente al gelo; essi non devono contenere in misura sensibile sostanze solubili, o residui organici e devono essere integri, senza zone alterate o rimovibili.

Gli elementi devono possedere i requisiti di resistenza meccanica ed adesività alle malte.

L'impiego di elementi provenienti da murature esistenti è subordinato al soddisfacimento dei requisiti sopra indicati, al ripristino della freschezza delle superfici a mezzo di pulitura e lavaggio delle superfici stesse ed al controllo dell'integrità strutturale dell'elemento con verifica della capacità di svolgere funzione statica.

I materiali lapidei si possono suddividere in:

Leggeri ( $w < 15 \text{ kN} / \text{m}^3$ )

Pesanti ( $w > 15 \text{ kN} / \text{m}^3$ )

Parametri da valutare in funzione dell'utilizzo:

- indice di porosità
- permeabilità all'acqua
- durezza
- durabilità
- gelività
- resistenza all'usura
- capacità coibente
- tenacità
- resistenza meccanica

Si suddividono in:

- pietre da taglio, provenienti da rocce compatte, con possibilità di essere estratte in blocchi di dimensioni prestabilite (graniti, basalti, porfido, travertini)
- pietre da sbizzo: non hanno una dimensione predefinita (tufo vulcanico, calcarenite)
- pietre da spacco: lavagna, ardesia
- pietrame da impasto: pietre utilizzate nel confezionamento di calcestruzzi

<b>Materiale</b>	<b>Densità (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Carico rottura a compressione (Mpa)</b>	<b>Modulo di elasticità <i>E</i> (Mpa)</b>
<b>Graniti</b>	2500-2900	100-200	50000-60000
<b>Porfidi</b>	2400-2700	100-250	50000-70000
<b>Basalto</b>	2700-3100	200-400	90000-120000
<b>Tufo vulcanico</b>	1100-1800	3-7	3000-15000
<b>Tufo calcareo</b>	1100-2000	1-50	-
<b>Calcari teneri</b>	2000-2400	10-40	20000-40000
<b>Calcari compatti</b>	2400-2700	50-150	20000-80000
<b>Dolomie</b>	2300-2900	100-110	40000-70000
<b>Travertini</b>	2200-2500	40-50	-
<b>Conglomerati Brecce</b>	2000-2700	80-150	-
<b>Arenarie</b>	1800-2700	40-130	5000-30000
<b>Marmi</b>	2700-2800	100-140	40000-70000

Le murature costituite dall'assemblaggio organizzato ed efficace di elementi e malta possono essere:

*1 - a singolo paramento,*

se la parete è senza cavità o giunti verticali continui nel suo piano

*2 - a paramento doppio.*

Sono presenti cavità o giunti verticali continui nel suo piano. E' possibile considerare un comportamento monolitico soltanto se è garantito un efficace e solido collegamento tra i paramenti (diatoni). In caso contrario sono necessari studi speciali. E' comunque da evitare nelle zone sismiche.

*Murature di pietra squadrata*

Gli elementi naturali sono di geometria pressoché parallelepipedica, posti in opera in strati regolari.

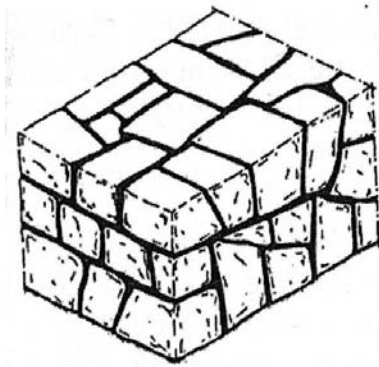
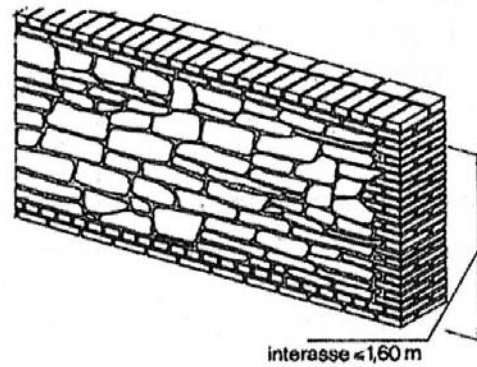
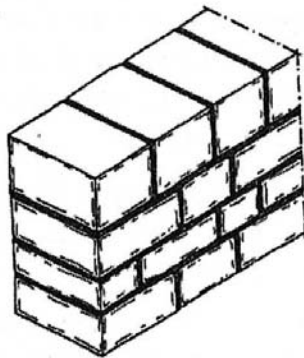
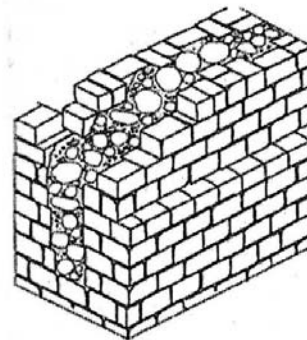
*Murature di pietra non squadrata*

Materiale di cava grossolanamente lavorato posto in opera in strati pressoché regolari.

*Murature listate*

Sono costituite dalla muratura in pietra non squadrata, intercalata, ad interasse non superiore a 1.6 m, da fasce per tutta la lunghezza e lo spessore del muro. Le fasce possono essere costituite da calcestruzzo o da ricorsi orizzontali di laterizio pieno.

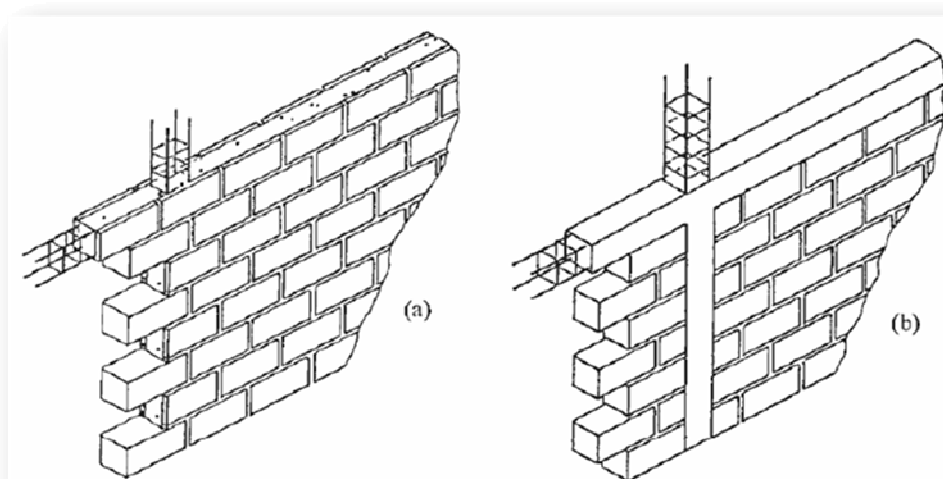


*Muratura non squadrata**Muratura listata**Muratura squadrata**Muratura a sacco**Muratura di blocchi di calcestruzzo*

Diversi edifici recenti di muratura a tutto spessore di blocchi pieni di calcestruzzo, localizzati sia a L'Aquila sia nelle sue frazioni, hanno superato lo scuotimento senza danni significativi. È verosimile che la semplicità di esecuzione garantisca una buona costruzione, che invece negli edifici di c.a. può essere ottenuta soltanto attraverso un'attenta direzione dei lavori e una manodopera qualificata.

*Muratura intelaiata*

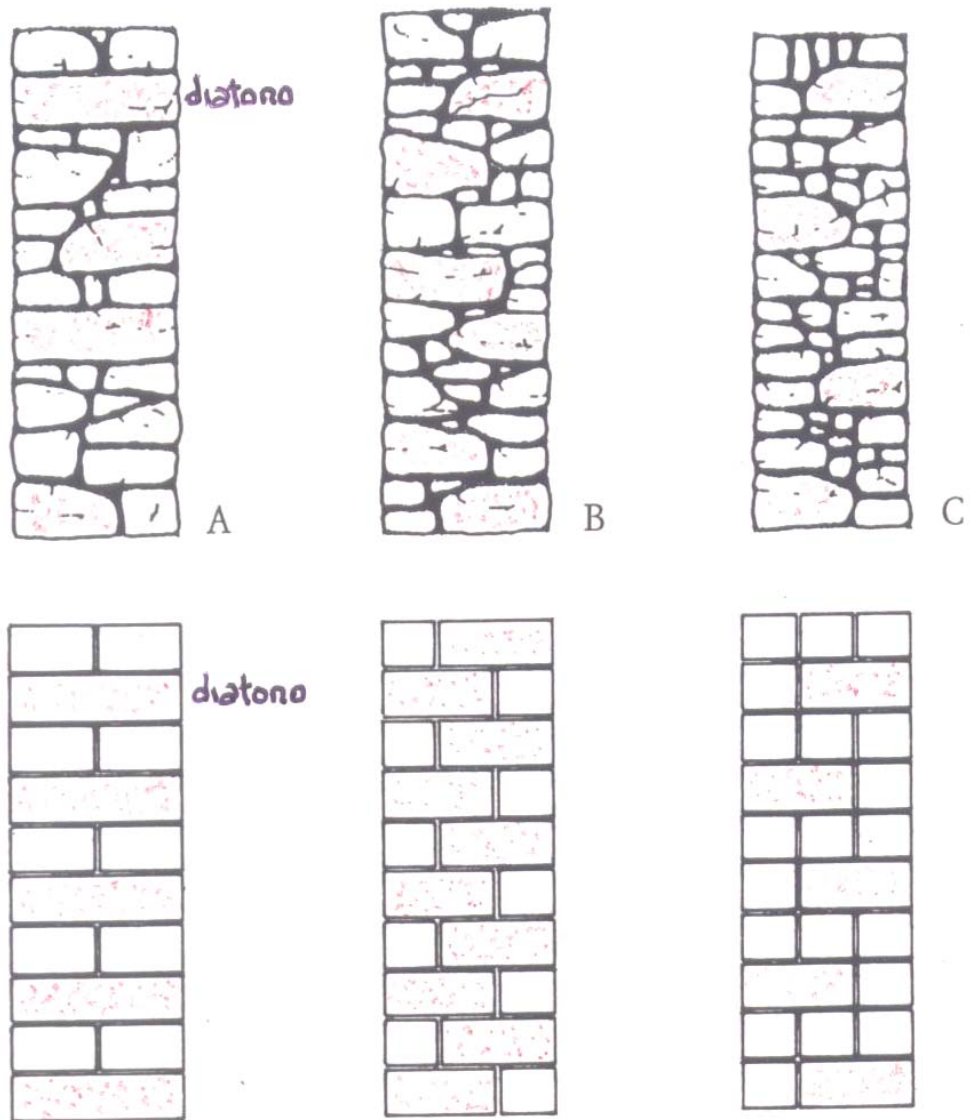
Nella muratura intelaiata (confined masonry) le membrature di c.a. sono aderenti ai pannelli murari, che però differiscono dai telai in c.a. tamponati per il ruolo portante della muratura. Questo tipo strutturale non è contemplato dalla Normativa Italiana, ma lo è dall'EuroCodice 8. La prestazione sismica di queste costruzioni si è dimostrata molto buona in numerosi terremoti distruttivi (Decanini e D'Amore 1993, Decanini 2005).



Muratura irregolare



Sezioni trasversali della muratura reale e modello meccanico



La muratura:

- 1 – non è omogenea
- 2 – ha comportamento non lineare
- 3 – è etero-resistente (trazione – compressione)
- 4 – è anisotropa

Una modellazione di dettaglio è al momento possibile soltanto per singoli pannelli murari, mentre per l'analisi di interi edifici si può al più ricorrere a modellazioni a continuo equivalente, seppure non lineare, etero-resistente, e con fessurazione diffusa.

Le proprietà fondamentali in base alle quali si classifica una muratura sono:

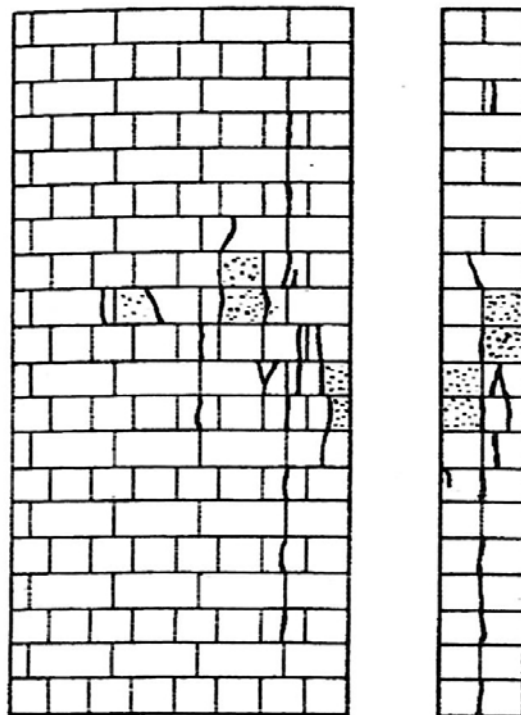
- 1 - Resistenza caratteristica a compressione  $f_k$
- 2 - Resistenza caratteristica a taglio in assenza di azione assiale  $f_{vk0}$
- 3 - Modulo di elasticità normale secante  $E$
- 4 - Modulo di elasticità tangenziale secante  $G$

La resistenze caratteristiche  $f_k$  e  $f_{vk0}$  sono determinate o per via sperimentale su campioni di muro o, con alcune limitazioni, in funzione delle proprietà dei componenti.

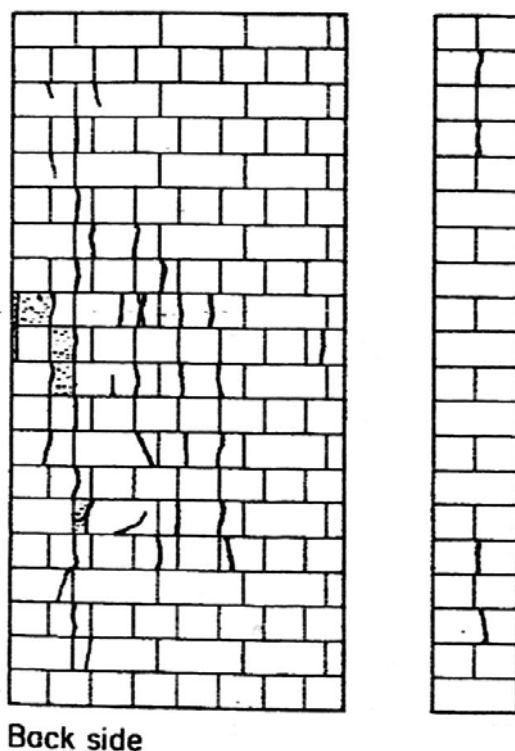
Naturalmente, nel caso delle murature storiche la via sperimentale su campioni di muro non è facilmente percorribile ed è necessario ricorrere a carote o ad altre procedure.

Per una modellazione non lineare sarà necessario aggiungere altri parametri.

Quadro fessurativo di un pannello murario soggetto a compressione assiale



**Front side**



### ***Parametri meccanici della muratura***

La stima dei parametri meccanici della muratura è affetta da notevole dispersione e incertezza. Ai fini di valutare l'attendibilità dei valori forniti in normativa è stato condotto uno spoglio bibliografico di circa 150 lavori sperimentali inserito nell'Allegato alle Linee Guida Bdl (Decanini, Sorrentino e De Sortis).

Sono state verificate formulazioni, sia su base meccanica sia su base empirica, disponibili in letteratura per determinare la resistenza del composito murario a partire dalle resistenze dei componenti (elementi e malta).

Le formule di Bröcker (1963) e Tassios (1985) si sono rivelate le più attendibili per le murature di tufo e mattoni rispettivamente. L'uso di queste formulazioni consente di limitare l'invasività delle indagini e il ricorso ai martinetti piatti doppi. Questi ultimi hanno talvolta portato a stime molto basse di resistenza anche per la notevole dimensione degli elementi tufacei.

## ***Ruolo dell'immorsatura fra muri trasversali e facciate***

L'immorsatura attritiva fra muri trasversali e facciate è della massima importanza nell'ostacolare il ribaltamento fuori del piano.

Ne consegue che è di grande importanza distinguere, anche sulla base della ricerca storica, fra muri immorsati e muri non immorsati, nonché indagare direttamente le caratteristiche geometriche delle connessioni. In particolare nel caso di muratura mista di tufo è fondamentale stabilire l'interasse fra le listature laterizie.

I diversi valori dell'immorsatura, corrispondenti all'interasse verticale fra le listature laterizie della muratura mista, possono avere un notevole impatto sul rapporto capacità/domanda.

L'andamento non è tuttavia lineare, ma interagisce con altre grandezze quali il carico presente, lo spessore dei muri trasversali, e così via. Tuttavia, in genere, man mano che la cerniera di ribaltamento si sposta verso l'alto il ruolo dell'interasse verticale fra le immorsature diviene meno rilevante.

In ogni caso è importante che si tenga conto, seppure in maniera approssimata, della presenza dell'immorsatura.

### **Bibliografia di riferimento**

*"Edifici in muratura alla luce della nuova normativa sismica" di Pietro Lenza e Aurelio Ghersi*

*"Edifici in muratura Progettazione degli interventi post-sisma" di A.Lemme, A.Martinelli, S.Podestà*



## **MAPPATURA DELLE VULNERABILITÀ RICORRENTI**

### ***Considerazioni generali***

Se il comportamento dell'edificio soggetto a prevalenti carichi verticali (condizione non sismica) risulta fortemente differenziato in relazione alla tipologia strutturale di appartenenza, tale differenza si accentua ove se ne consideri il comportamento sotto l'azione anche di rilevanti azioni orizzontali (condizione sismica).

Nella "Relazione illustrativa" si fa riferimento agli Edifici della Prima, della Seconda e della Terza classe e per evidenziare i possibili diversi comportamenti strutturali si è fatto riferimento alla predetta classificazione prendendo in considerazione anche possibili situazioni intermedie tra le suddette classi, derivanti da interventi strutturali ( ad esempio introduzione di catene ).

Nella condizione sismica la predetta classificazione rimane alla base della trattazione ma la rassegna delle possibili variazioni si arricchisce ulteriormente. Le "variabili" strutturali che determinano tali differenze sono essenzialmente legate alla configurazione dell'impalcato e delle fasce di piano delle pareti. Tali variabili peraltro non sono del tutto indipendenti tra loro perché alcuni assetti dell'impalcato determinano anche una conseguente configurazione della fasce. L'impalcato condiziona in maniera rilevante il comportamento globale dell'edificio nella condizione sismica. Esso, infatti, può svolgere nel piano orizzontale due diverse funzioni, entrambe molto importanti: collegare trasversalmente le pareti di facciata al resto della struttura, evitandone il ribaltamento fuori dal piano; ripartire le azioni sismiche tra le pareti disposte nella direzione del sisma.

La possibilità che tali funzioni siano effettivamente esplicate dipende dalla tipologia dell'impalcato, che in genere è strettamente connessa alla tipologia dell'edificio. Ad esempio gli edifici della prima classe presentano orizzontamenti interamente voltati che non sono in grado di collegare efficacemente le pareti di facciata all'impalcato stesso, ma possono presentare una rigidità sufficiente a ripartire, almeno in parte, le azioni sismiche tra le varie pareti. Al contrario, gli impalcati con travi in legno o in acciaio, tipici degli edifici della seconda classe,

potrebbero collegare le pareti di facciata ortogonali all'orditura dei solai grazie all'attrito o agli eventuali ancoraggi (i cosiddetti radicamenti, purtroppo raramente presenti), ma difficilmente presentano una rigidezza nel piano sufficiente per una efficace ripartizione.

Sono possibili diverse combinazioni tra le due funzioni e la configurazione delle pareti murarie, a ciascuna delle quali corrispondono diversi possibili comportamenti globali, che richiedono schemi di calcolo ed attenzioni differenti in sede di verifica. All'atto pratico, cioè per la determinazione della capacità di resistenza dell'edificio alle azioni orizzontali, è comunque fondamentale valutare innanzitutto se tale capacità è condizionata dal comportamento delle pareti al di fuori del piano o nel proprio piano. La resistenza di una parete muraria sollecitata nel proprio piano è, infatti, sempre notevolmente superiore alla sua resistenza fuori del piano, se questa non è efficacemente contrastata da vincoli al livello dell'impalcato.

Analisi strutturale (ntc 2008)

La risposta strutturale è calcolata usando:

- analisi semplificate.
- analisi lineari, assumendo i valori secanti dei moduli di elasticità
- analisi non lineari

Per la valutazione di effetti locali è consentito l'impiego di modelli di calcolo relativi a parti isolate della struttura.

Per il calcolo dei carichi trasmessi dai solai alle pareti e per la valutazione su queste ultime degli effetti delle azioni fuori dal piano, è consentito l'impiego di modelli semplificati, basati sullo schema dell'articolazione completa alle estremità degli elementi strutturali.

## ***Lo studio del comportamento sismico degli edifici in muratura***

Il patrimonio edilizio storico, come quello di Carapelle Calvisio, è costituito principalmente da edifici in muratura. È possibile individuare, inoltre, due categorie di edifici: speciali e ordinari. Alla prima appartengono fabbricati con funzione di rappresentanza, spesso costituiti da ambienti molto ampi, adeguati ad ospitare assemblee collettive, mentre la seconda è rappresentata da edifici che costituiscono l'edilizia di tessuto dei centri storici spesso adibiti a funzione residenziale, come frequentemente si trova nel borgo di Carapelle Calvisio, e caratterizzati da locali di dimensioni modeste con una disposizione dei setti murari in pianta che si ripete con sostanziale regolarità in altezza (piano tipo) e con pareti verticali portanti disposte in entrambe le direzioni principali dell'edificio, che gli conferiscono una conformazione globale di tipo scatolare. Nella realtà ci si trova però spesso di fronte a situazioni intermedie che potremmo definire come "edifici particolari".

Al termine *edificio in muratura* possono essere, quindi, associate forme di edilizia molto diverse fra loro a cui corrispondono differenti comportamenti sismici: la varietà di tipologie è principalmente legata a caratteri tecnologici generalmente dipendenti dal sito di costruzione, dall'epoca storica e dalla destinazione d'uso originaria. L'analisi della capacità sismica di tali edifici riveste, alla luce della nuova zonazione sismica del territorio italiano (secondo le NTC08), un rilievo fondamentale, in particolare con riferimento alle tipologie abitative storiche caratteristiche dei secoli dal XVI al XIX, che risultano le più danneggiate in occasione di eventi sismici di una certa entità, come nel caso di Carapelle Calvisio. La necessità di condurre uno studio della vulnerabilità sismica di un edificio ha come obiettivo la salvaguardia delle persone e spesso l'esigenza di tutelare un valore storico, artistico, archeologico o paesaggistico.

Il comportamento globale della struttura all'azione sismica è fortemente influenzato, ancor prima che dalle caratteristiche intrinseche dei singoli elementi strutturali, dal grado di connessione presente tra essi. Carenze nel collegamento tra pareti ortogonali e tra pareti ed orizzontamenti fanno sì che la struttura non sia in grado di sviluppare, durante il terremoto, una risposta globale che chiami a collaborare fra loro le diverse pareti ed a ripartire tra esse

le sollecitazioni indotte. In questo caso, infatti, si ha una risposta pressoché indipendente della singola parete con una limitata interazione con il resto della fabbrica. La realizzazione del comportamento scatolare fa sì che per l'edificio si possa definire una vulnerabilità globale che dipende dalla risposta sismica di tutto il sistema strutturale,

*Esempio di edifici ordinari con conformazione globale di tipo scatolare*



*Esempio di edifici speciali a cui corrispondono differenti comportamenti sismici*



governata dalla risposta nel piano delle pareti e dall'azione di collegamento e ripartizione esercitata dagli orizzontamenti.

In tal senso la configurazione dell'impalcato svolge un ruolo fondamentale per il comportamento meccanico dell'edificio sia nei confronti delle azioni sismiche che verticali. Questo elemento è stato assunto da Pagano come discriminante per la classificazione degli edifici in muratura, distinguendo tra *prima*, *seconda* e *terza* classe [M. Pagano, 1968; M. Pagano, 1990]: l'edificio di prima classe, corrispondente alla tipologia più antica, è integralmente in muratura, con archi e volte che garantiscono un regime di sollecitazioni di sola compressione; l'edificio della seconda classe è costituito da elementi murari verticali che sostengono solai orizzontali semplicemente appoggiati; l'edificio di terza classe è costituito da impalcati in cemento armato solidali con le pareti portanti. Tale classificazione è relativa in particolare al comportamento degli edifici in muratura per carichi verticali. In conclusione è possibile allora affermare che lo studio del comportamento sismico dell'edificio in muratura deve sempre partire dalla conoscenza della sua storia costruttiva e deve essere poi mirato a comprendere la sua risposta alle azioni sismiche. In effetti a preoccupare per la stabilità dell'edificio, e quindi per la sua conservazione, sono proprio queste azioni di cui in passato non si teneva conto. Per poter fare ciò è necessario, tuttavia, modellare in maniera adeguata la struttura-

### ***Corrispondenze fra edifici diversi***

Un'altra importante procedura da seguire per il borgo di Carapelle Calvisio consiste in un confronto diretto fra edifici diversi. Infatti "Qualora esista una chiara, comprovata corrispondenza tipologica per materiali, pezzatura dei conci, dettagli costruttivi, in sostituzione delle prove sull'edificio oggetto di studio possono essere utilizzate prove eseguite su altri edifici presenti nella "zona dell'edificio". È allora evidente che la corrispondenza diviene documentata laddove sia possibile dimostrare che due edifici, per uno dei quali siano già disponibili dati sui materiali, sono stati costruiti in epoche ravvicinate e dalla stessa impresa. Le vicinanze temporale e geografica da sole non sono tuttavia sufficienti per inferire una diretta corrispondenza di dettagli e proprietà meccaniche.

## ***L' aggregato strutturale***

Per *aggregato strutturale* si intende un insieme di uno o più edifici tra loro collegati strutturalmente e in genere coincidenti con un isolato. Vanno considerati aggregati a sé stanti anche quelli collegati in maniera “debole”.

L'edificio può essere così caratterizzato:

- per gli organismi isolati, l'intero complesso esteso in altezza dalle fondazioni alla copertura e planimetricamente individuato dalle chiusure verticali, comprendente le eventuali parti in aggetto; qualora l'edificio isolato fosse strutturalmente suddiviso in più parti da giunti verticali, di ampiezza non inferiore a quella prescritta per i giunti sismici, si può considerare ogni singola parte come edificio; pertanto l'edificio viene in tali casi definito come unità urbanisticamente isolata o strutturalmente isolata con giunti sismici;
- se si può identificare un organismo dotato di caratteri di unitarietà come tipologia ed epoca di costruzione, continuità delle chiusure verticali ed omogeneità delle quote degli orizzontamenti, può essere considerato edificio un corpo di fabbrica planimetricamente aggregato, a condizione che vengano opportunamente valutate le interazioni con i corpi contermini. Per tali situazioni la porzione da esaminare viene definita, oltre che dalle pareti di chiusura verticale libere, da sezioni verticali passanti per le mezzerie dei vani adiacenti alle pareti di chiusura verticale di confine.

## ***L'analisi sismica dell'edificio ordinario.***

- Analisi dei carichi verticali da attribuire alle diverse pareti in ragione anche delle modalità di scarico degli impalcati (solai o volte). Questa fase prescinde dalla tipologia e consente di attribuire ai maschi delle diverse pareti i carichi verticali che andranno considerati anche come masse traslazionali nelle due direzioni.



- Modellazione ed analisi dell'edificio: costituisce un passo delicato e decisivo per la correttezza dell'analisi perchè a parità di geometria globale possono configurarsi situazioni strutturali molto diverse tra loro.
- Edificio dotato di impalcato con inaffidabile capacità distributiva e di collegamento tra le pareti, le quali presentano fasce di piano prive di capacità di accoppiamento.
- Si richiede l'analisi delle singole pareti nel piano e fuori del piano. Dall'analisi fuori del piano sono senz'altro da attendersi le maggiori criticità.
- Edificio dotato di impalcato con qualche capacità distributiva e di collegamento tra le pareti, grazie alla integrità delle croci di muro. I ritti negli incroci possono essere collegati tra loro da vincoli interni del tipo "diaframma" che ne assicurano un moto rigido solidale. E' necessaria un'analisi globale dell'edificio, considerando le fasce delle pareti prive di capacità di accoppiamento, ed inoltre un'analisi delle singole pareti fuori dal piano, ma in condizioni vincolari più favorevoli rispetto al caso precedente (verifica degli archi di scarico in orizzontale).
- Edificio dotato di impalcato deformabile con capacità sia di collegamento che distributiva, grazie alla presenza di catene disposte lungo le pareti. Si richiede un'analisi globale dell'edificio modellando l'impalcato con elementi diagonali non resistenti a trazione e vincolando tra loro le aste rappresentative delle croci di muro con vincoli del tipo diaframma orizzontale che possono legare separatamente ciascuno dei due ritti al nodo di vertice (possibile apertura delle croci di muro) ovvero che leghino i tre nodi con un unico vincolo (indeformabilità della croce). Le singole pareti, dotate di

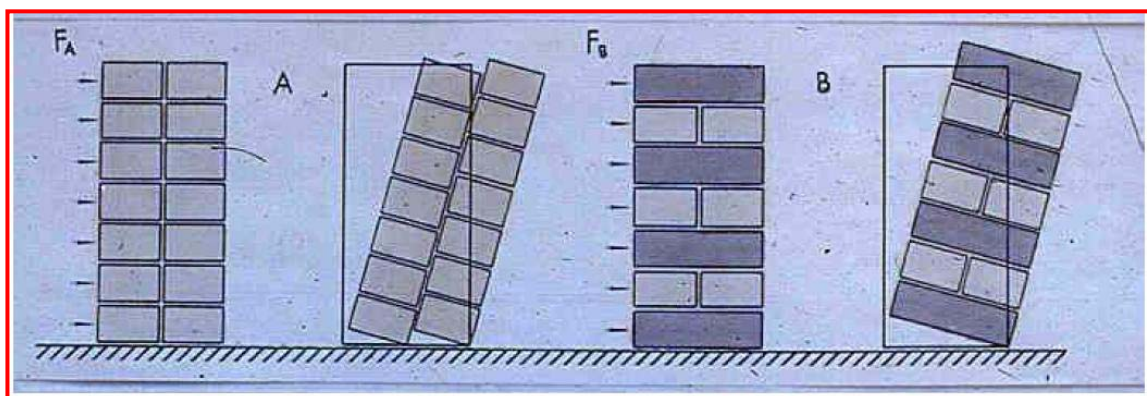
fasce “puntone” con limitata capacità di accoppiamento, vanno analizzate nel piano

- Edificio dotato di impalcato infinitamente rigido e sufficientemente resistente nel piano orizzontale, che assicura un ottimo collegamento ed una elevata capacità distributiva. Per l'analisi globale dell'edificio, assimilabile ad un telaio spaziale a piani rigidi, tutti i nodi del piano sono legati da un unico vincolo del tipo diaframma. Le singole pareti, dotate di fasce trave ad elevata capacità di accoppiamento assicurata dalla presenza di cordoli e piattabande, vanno analizzate nel piano e fuori dal piano.

## **Azioni**

Si possono manifestare meccanismi locali e meccanismi d'insieme, da verificare entrambi:

- I meccanismi locali interessano singoli pannelli murari o più ampie porzioni della costruzione, e sono favoriti dall'assenza o scarsa efficacia dei collegamenti tra pareti e orizzontamenti e negli incroci murari. In particolare sono da considerare le azioni ortogonali al muro (primo modo di collasso).
- I meccanismi globali sono quelli che interessano l'intera costruzione e impegnano i pannelli murari prevalentemente nel loro piano (secondo modo di collasso).

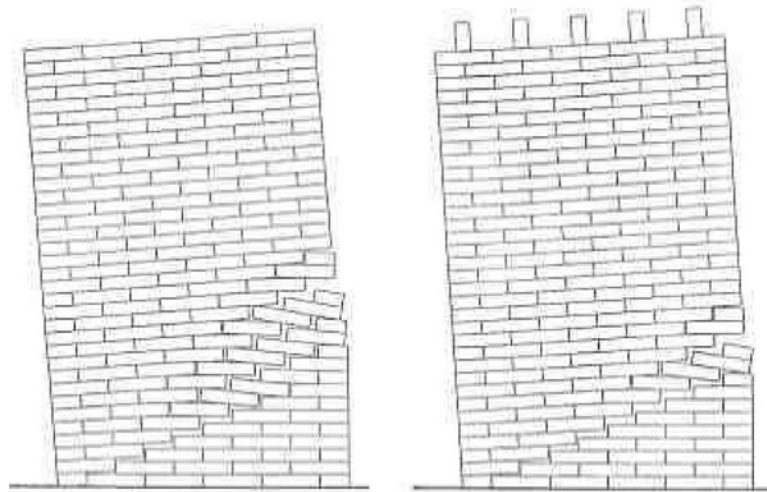


*Comportamento monolitico, ribaltamento intorno ad uno spigolo di base:*

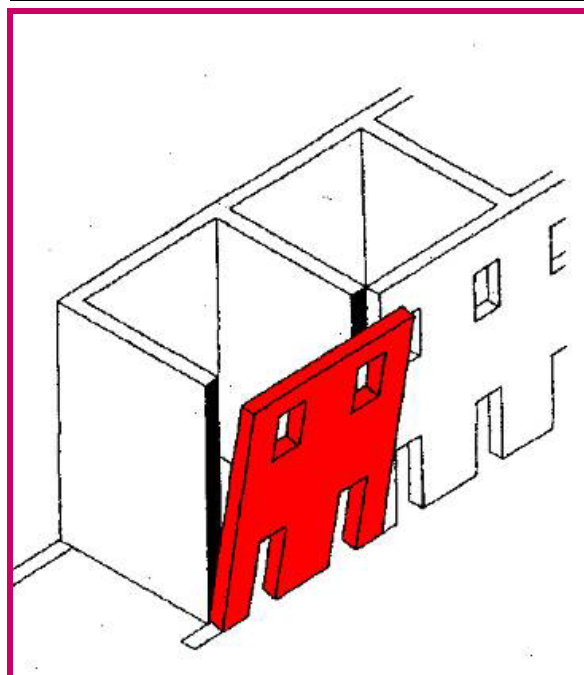
Orizzontalità dei ricorsi: garantisce una cerniera cilindrica attorno alla quale il moto di ribaltamento può avvenire senza disgregare la parete;

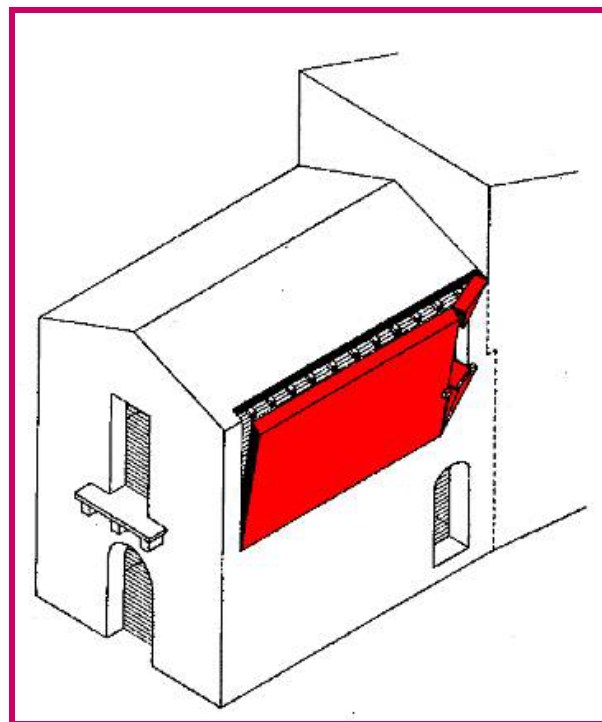
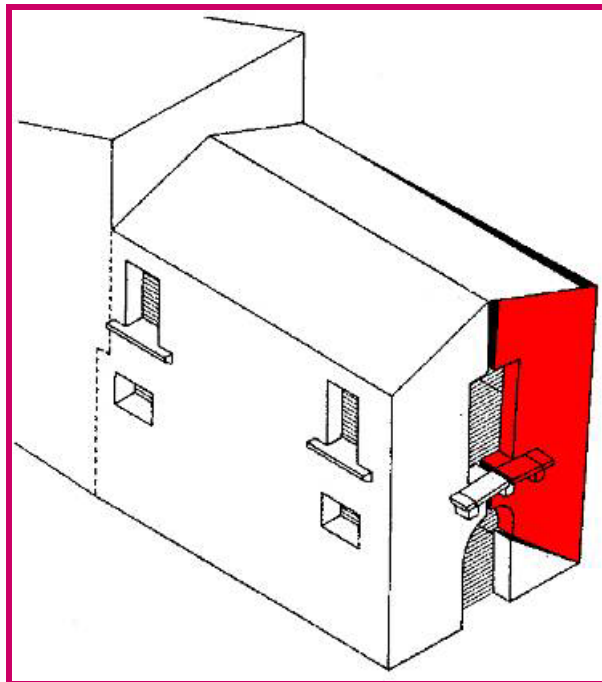
Presenza di diatoni: legano la parete nello spessore. La massima forza orizzontale che una parete in opera quadrata può sopportare è funzione del numero e della lunghezza dei diatoni (quando i diatoni sono assenti, il collasso non è di tipo monolitico e la resistenza alle azioni è minima).

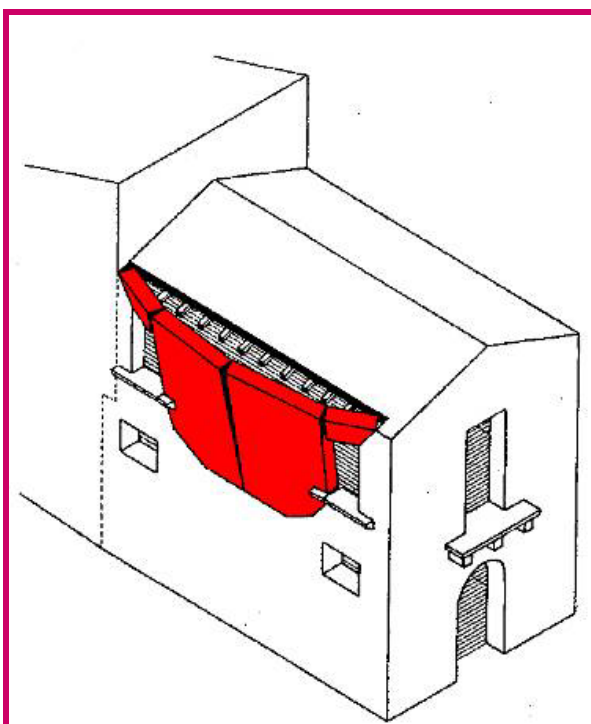
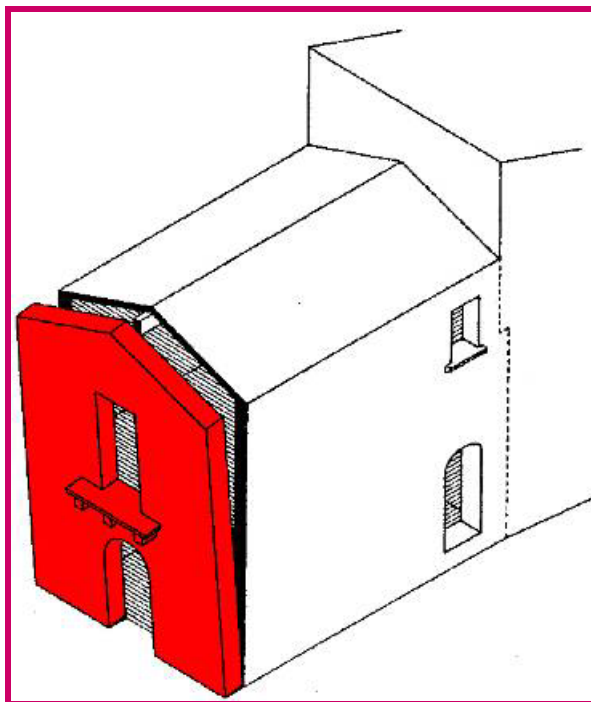
*Meccanismi di rottura che dipendono dal tipo di tessitura e dal numero e dalla lunghezza degli ortostati.*

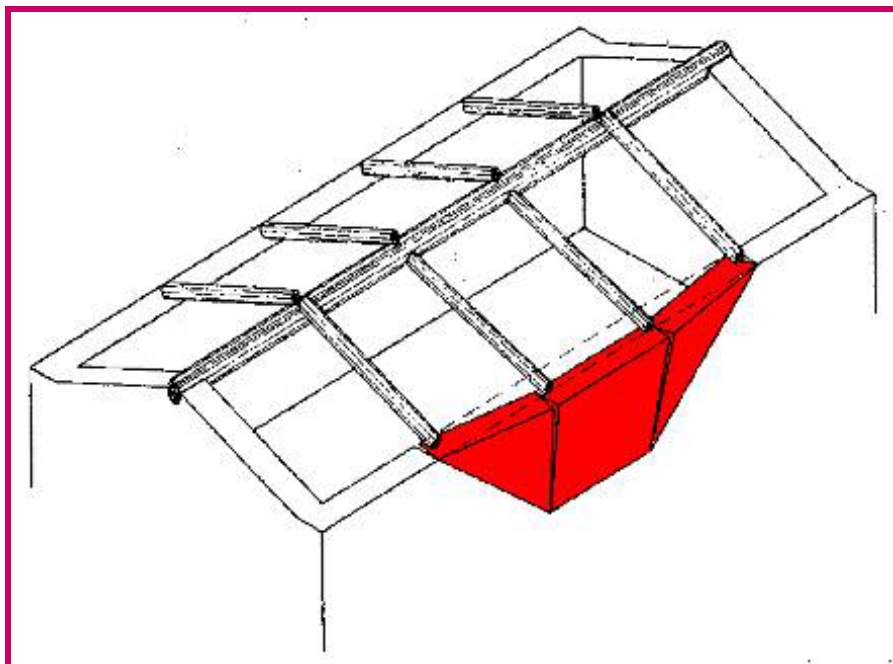


*Modi di deformazione della cella muraria.*

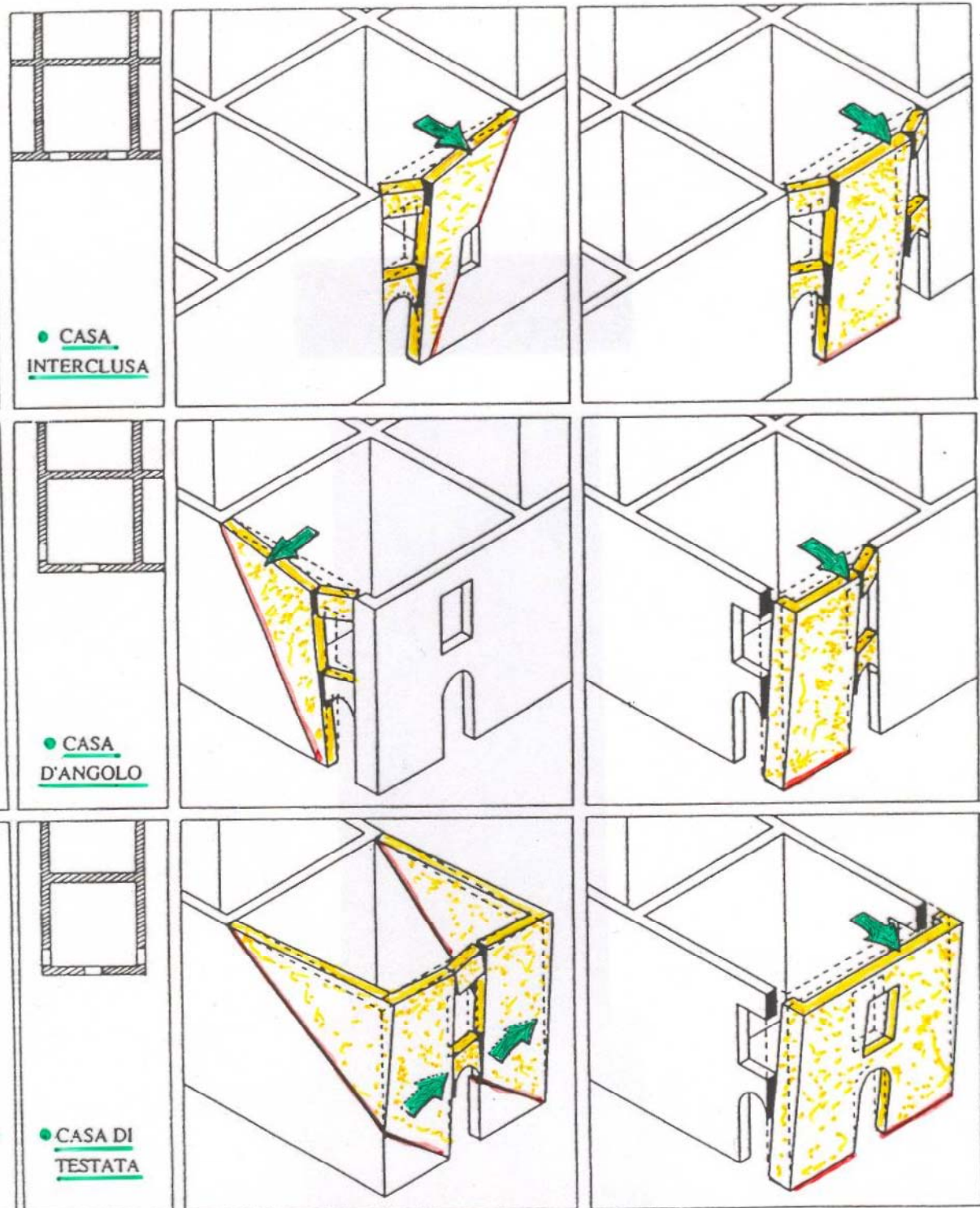






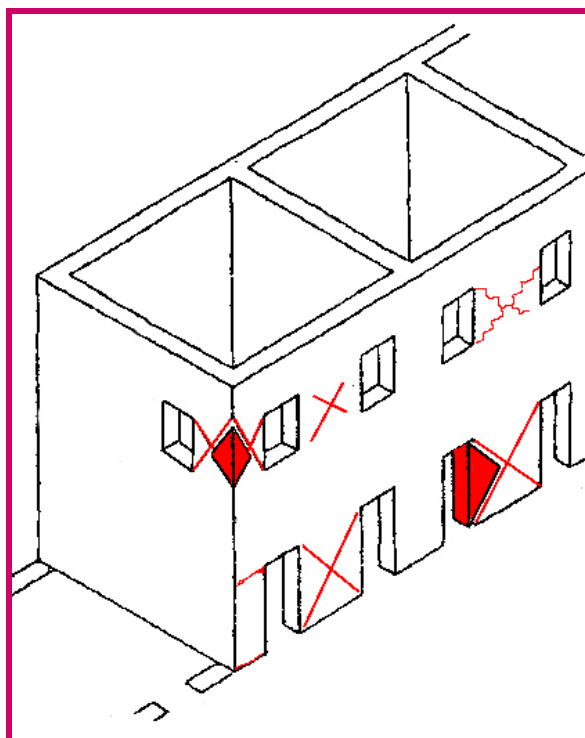


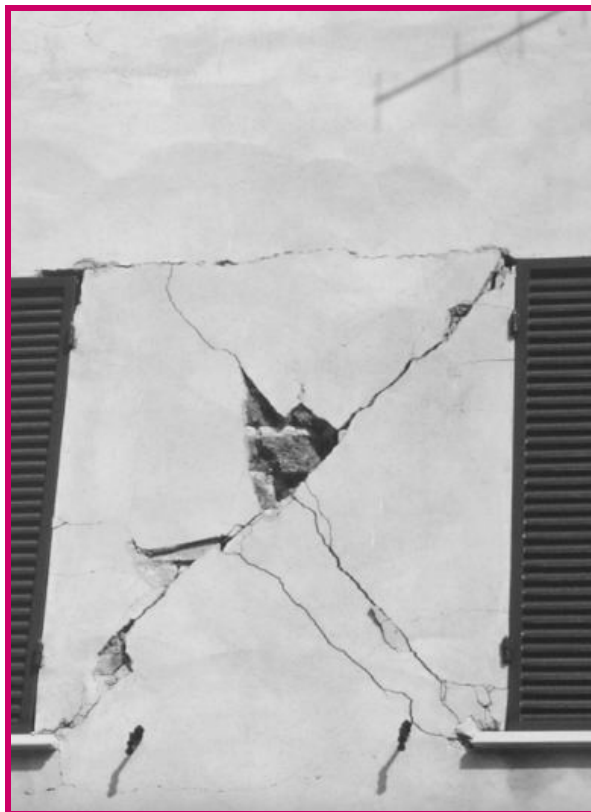


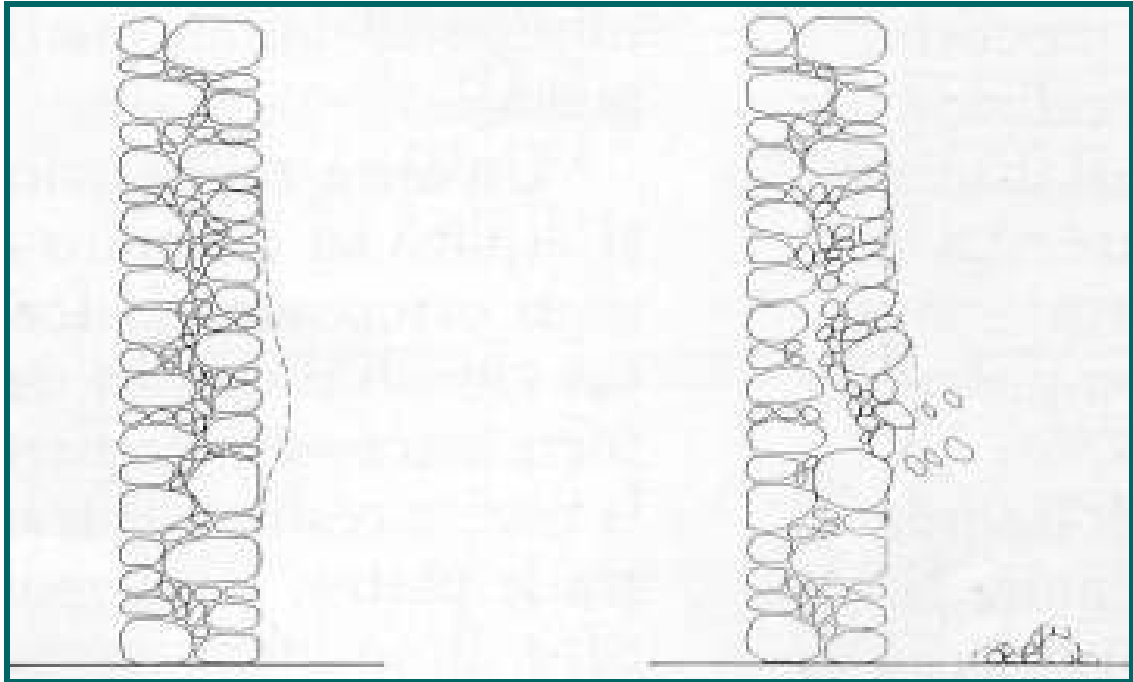


*Meccanismi globali:*

Lesioni delle pareti murarie nel piano: taglio



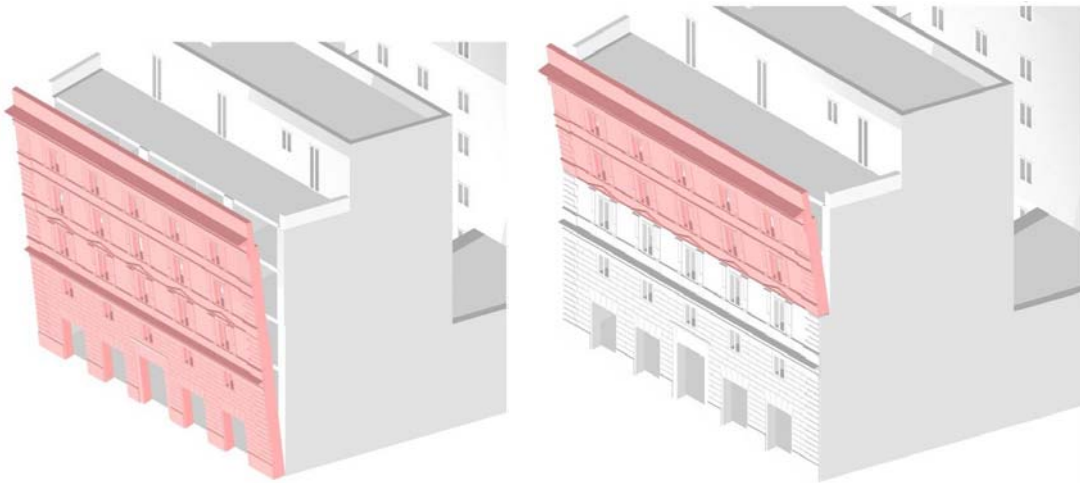


**Danneggiamento delle pareti murarie nel piano: taglio****Ruolo della posizione della cerniera di ribaltamento**

Poiché l'approccio cinematico fornisce un limite superiore al moltiplicatore di collasso, è necessario considerare diversi meccanismi al fine di minimizzarlo.

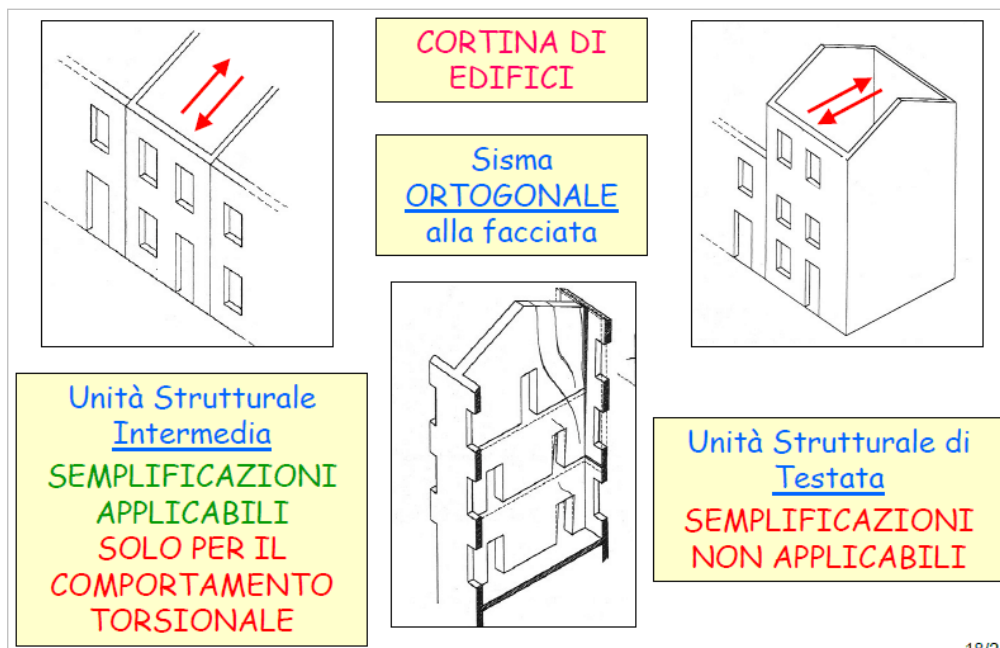
La variazione lungo la facciata di:

- caratteristiche meccaniche e geometriche della muratura,
- tipo di struttura orizzontale,
- caratteristiche geometriche dell'immorsatura attritiva,
- numero e dimensione delle aperture,
- accelerazione d'inerzia lungo l'altezza,
- rendono difficile stabilire quale condizione è più gravosa.

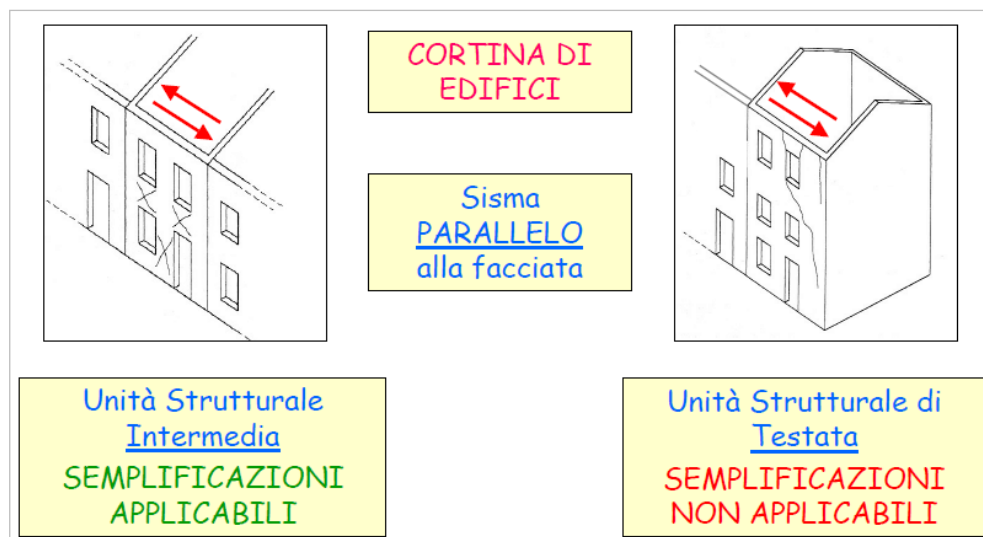
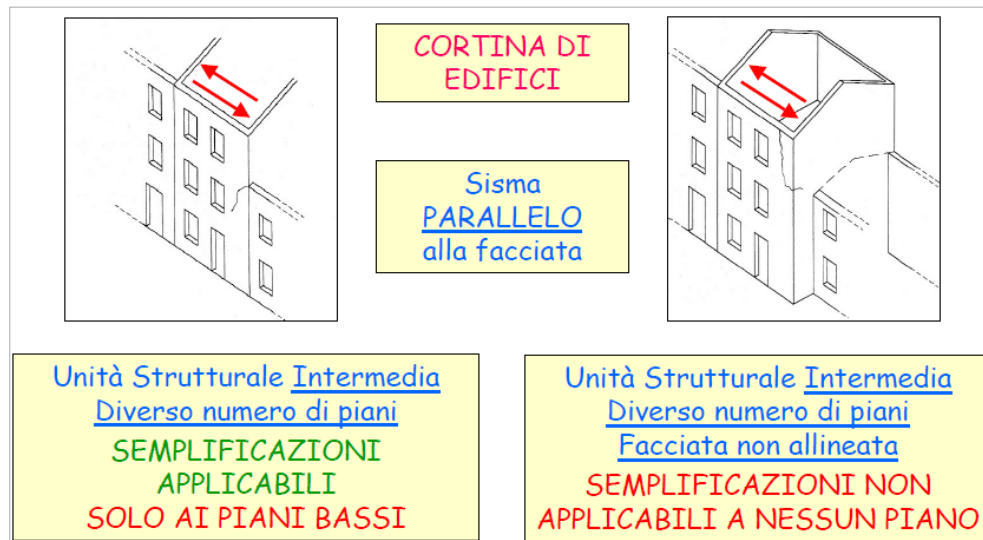


Comportamento sismico globale delle Unità Strutturali:

Verifica delle parete nel proprio piano.



18/21



## ***Comportamento della fascia di piano delle pareti murarie per azioni sismiche***

La tipologia degli edifici in muratura ordinaria, che costituiscono il “tessuto storico” delle nostre città, è stato oggetto, dal secolo scorso fino ad oggi, di numerose modifiche conseguenti all'utilizzo di nuove tecnologie. Pertanto, pur con assetto geometrico

complessivo praticamente invariato, ne sono derivate tipologie strutturali diverse da quella originaria. L'elemento strutturale maggiormente interessato da tale evoluzione è stato l'impalcato, che, come è noto, svolge una funzione determinante nel comportamento

sismico globale dell'edificio. Infatti se esso non è in grado di collegare efficacemente tra loro le murature verticali, le azioni sismiche determinano sollecitazioni flessionali agenti al di fuori dal piano delle pareti, che possono causare meccanismi di ribaltamento

delle stesse. L'edificio in tal caso evidenzia una vulnerabilità sismica molto alta corrispondente ad un preoccupante scenario di crollo. Viceversa, quando l'impalcato è in grado di svolgere la funzione di collegamento e, se sufficientemente rigido, anche di distribuzione delle forze, le azioni orizzontali sollecitano le pareti a taglio-flessione nel proprio piano (controventi). Pertanto la vulnerabilità sismica risulta molto minore, determinando comportamenti globali spesso accettabili per gli edifici esistenti. Di conseguenza, in tal caso, diventano fondamentali le caratteristiche comportamentali sia dei maschi murari che delle fasce di piano, che costituiscono ciascuna parete muraria.

In particolare la fascia di piano svolge un ruolo fondamentale per la resistenza e la deformabilità (e quindi la duttilità) della parete stessa. Infatti, al variare della sua morfologia e quindi della tipologia strutturale, si ottengono differenti gradi di accoppiamento tra i maschi murari con comportamenti strutturali della parete molto diversi, a parità di assetto geometrico e di carichi verticali agenti. Con fasce di piano molto rigide e resistenti (in relazione ai maschi), durante l'evento sismico si può evidenziare un comportamento di piano del tipo shear-type; al contrario, con fasce molto deboli, il comportamento della parete è simile a quello di mensole estese all'intera altezza dell'edificio. Le attuali normative



sismiche per gli edifici in muratura non armata non sembrano invece sufficientemente approfondite in relazione alle fasce di piano ed alla valutazione della loro resistenza, a testimonianza di una carenza di approfondimento sia teorico che sperimentale. In particolare l'EC8 ammette una capacità di accoppiamento dei pannelli di fascia solo se dotati di armatura sia superiore che

inferiore, cioè con un classico comportamento a trave. La norma americana FEMA 375 non fa invece alcun riferimento esplicito a come

valutare le capacità di accoppiamento delle fasce, pur considerando

possibile un comportamento del tipo shear-type dei maschi murari per valutare la resistenza

flessionale ed a taglio degli elementi di fascia di piano (travi in muratura), purché dotati di un

elemento orizzontale tensoresistente (catena, cordolo, piattabanda efficacemente ammorsata etc), rimandando alla muratura armata il

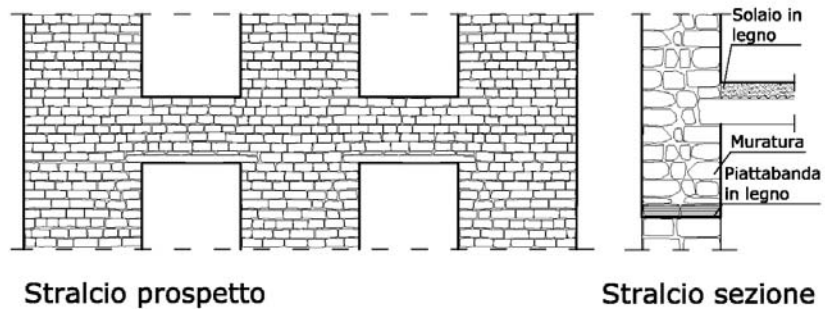


Figura 1. Fascia di piano caratterizzata dalla presenza di solai e piattabande in legno.

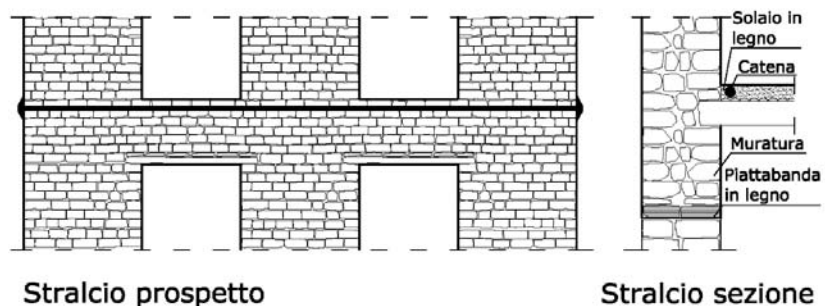


Figura 2. Fascia di piano caratterizzata dalla presenza di solai e piattabande in legno consolidata, attraverso l'inserimento di una catena metallica.

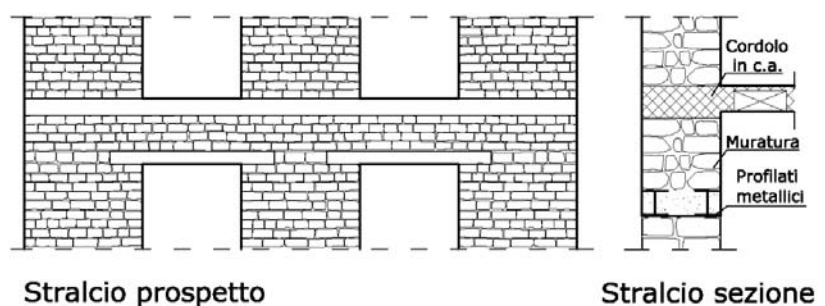


Figura 3. Fascia di piano caratterizzata dalla presenza di piattabande dotate di un elemento orizzontale tensoresistente (cordolo, piattabanda efficacemente ammorsata etc), rimandando alla muratura armata il

caso di fascia con comportamento a trave. In questo lavoro, pertanto, si analizza, anche mediante una campagna sperimentale condotta ad hoc su elementi murari in scala ridotta (circa 1:10), il comportamento resistente e deformativo di una delle più comuni tipologie di fascia di piano individuabili negli edifici esistenti.

### **Le diverse tipologie di fascia di piano**

Le molteplici configurazioni delle fasce di piano riscontrabili nell'ambito del costruito storico sono state descritte in dettaglio in (Calderoni et al. 2007). Partendo da tali configurazioni sono state definite tre differenti tipologie di comportamento strutturale:

#### **a) fascia priva di significativa capacità di accoppiamento (fascia debole)**

Questa tipologia comprende le fasce di piano caratterizzate da piattabande ad arco o con elementi lignei o metallici semplicemente appoggiati, senza ancoraggi, alle spalle dei vani. Esse sono tipiche degli edifici più antichi con orizzontamenti a volte o con solai con travi parallele in legno od acciaio e sono prive in pratica di qualsiasi elemento tensoresistente (figura 1). In genere alla loro conseguente "debolezza" è associata anche l'inaffidabilità dell'impalcato ad assicurare un comportamento a diaframma rigido. La mancanza di affidabile resistenza a trazione della muratura comporta l'incapacità di resistere a taglio e flessione e quindi

di accoppiare i maschi murari se la parete è soggetta a forze orizzontali.

#### **b) fascia con comportamento a puntone (fascia- puntone)**

In questa tipologia rientrano le fasce di piano dotate di almeno un elemento orizzontale resistente a trazione, che sia efficacemente ancorato in modo da impedire spostamenti relativi tra i singoli pannelli della fascia (figura 2). Pertanto può nascere all'interno della fascia di piano uno sforzo normale orizzontale di compressione (di valore non noto) che rende il pannello simile ad un maschio murario, con un comportamento a puntone equivalente (Magenes et al., 2000), (Liberatore, 2000). La differenza sostanziale è che nel pannello di fascia il valore dello sforzo normale che nasce al suo interno e del taglio che il pannello stesso può trasmettere sono in relazione diretta tra loro (Calderoni et al., 2007),

mentre nei maschi murari lo sforzo normale è noto e non dipende dal taglio agente.

In ogni caso la possibilità di attivarsi di tale meccanismo, come si mostrerà nel seguito, dipende anche dalla forma (snellezza) del pannello di fascia. Figura 1: Fascia di piano caratterizzata dalla presenza di solai e piattabande in legno. Figura 2: Fascia di piano caratterizzata dalla presenza di solai e piattabande in legno consolidata, attraverso l'inserimento di una catena metallica. Figura 3: Fascia di piano caratterizzata dalla presenza di piattabande in profilati metallici e cordoli di piano in c.a.

### *c) fascia con comportamento a trave (fascia-trave)*

In questa categoria rientrano tutte le fasce di piano dotate di armature aderenti sia inferiormente che superiormente (sotto forma ad es. di cordoli, piattabande ben ammorsate o continue, catene aderenti etc.). È possibile allora l'attivazione di un vero e proprio comportamento flessionale a trave, con resistenza a taglio e a flessione praticamente disaccoppiate e valutabili come per una trave in muratura armata. È chiaro però che, in mancanza di specifiche armature, il taglio trasmissibile è limitato comunque dalla resistenza a taglio del materiale muratura, che costituisce la parte centrale (anima) della trave e non già dai massimi momenti flettenti sopportabili dalle estremità della trave (figura 3).

### ***Comportamento delle pareti fuori dal piano***

Analizzare il comportamento delle pareti fuori dal piano deve essere sempre il primo passo nell'analisi di un edificio esistente. Le pareti possono essere vincolate anche dai muri ortogonali, perché si possono instaurare archi orizzontali che riportano a questi l'azione sismica. La distanza tra pareti ortogonali, spesso elevata, la presenza di lesioni nelle croci di muro o la posizione e conformazione delle aperture nelle pareti rende però spesso impossibile tale meccanismo. Esso può essere certamente preso in considerazione in sede teorica di studio, ma difficilmente se ne può fare affidamento per la verifica reale di un edificio sottoposto a terremoti di entità corrispondente allo SLV. Il compito di fungere da vincolo nei confronti del ribaltamento rimane quindi affidato principalmente agli impalcati. In genere è

abbastanza facile individuare, se esistente, la capacità dell'impalcato di collegare ai vari piani le pareti perimetrali con il resto dell'edificio. La mancanza di un tale collegamento si presenta come una condizione fortemente critica, perché i maschi murari sono in tal caso mensole a tutt'altezza. In tali condizioni il comportamento di ciascun maschio murario è ovviamente autonomo, cioè indipendente dal resto della struttura, ed esso è quindi soggetto ad azioni sismiche correlate alla massa corrispondente alla sua area di influenza. La verifica può essere effettuata in termini di puro equilibrio, analizzando il corrispondente meccanismo, come indicato anche dalle NTC 08 (analisi dei meccanismi locali). Nel caso in cui l'equilibrio risulti assicurato, si procede anche in termini di resistenza locale delle sezioni più caricate. In queste condizioni l'eventuale capacità dell'impalcato di ripartire le azioni orizzontali (che può esistere anche in assenza dei collegamenti con le facciate) diventa insignificante ai fini della verifica, perché l'effetto ripartitorio si esplica solo nei confronti delle pareti disposte nella direzione del sisma, senza sgravare quelle perimetrali (a causa della mancanza dei collegamenti) dalle masse che competono loro. Da quanto detto è evidente che la capacità sismica di un edificio privo di efficaci collegamenti di piano risulterà in genere molto bassa, tanto che i primi interventi di recupero e/o miglioramento, da adottare comunque negli edifici esistenti delle prime due classi, sono proprio quelli volti ad assicurare tali collegamenti (edifici delle prime due classi migliorati).

**Comportamento delle pareti nel piano**

Quando i collegamenti delle pareti perimetrali agli impalcati sono già di per sé efficaci (come nel caso degli edifici della terza classe), o lo sono stati resi con opportuni interventi, ed è quindi di fatto annullata la possibilità di ribaltamenti fuori piano, la capacità sismica dell'edificio è condizionata dal comportamento delle pareti nel proprio piano.

Gli elementi resistenti principali verso le azioni orizzontali sono sempre costituiti dalle pareti orientate nella direzione del sisma. Ne consegue che assumono funzione di controvento alternativamente quelle orientate nelle due direzioni principali del fabbricato.

Ipotizzando un tipico impalcato di un edificio, potremmo individuare sezioni resistenti principali, sollecitate nel piano della parete, ed altre, per così dire

isolate ed esposte a fenomeni fuori dal piano. Nel caso che l'edificio sia dotato di impalcato rigido e che questo tenda a ruotare saranno attivate, per sisma agente in una sola direzione, anche le pareti orientate nell'altra direzione.

Nel valutare il comportamento globale della struttura assume, come già detto, notevole importanza la maggiore o minore rigidezza (e resistenza) nel piano dell' impalcato o, meglio, la sua capacità di ripartire le azioni sismiche tra le pareti disposte nella direzione del sisma agente.

La mancanza di sufficiente rigidezza dell'impalcato, non deve però essere considerata necessariamente come una situazione particolarmente negativa: infatti la conseguenza è unicamente quella di non consentire ridistribuzioni di azioni orizzontali tra le varie pareti interessate, nel senso che le forze che sollecitano ogni parete saranno proporzionali alle corrispondenti masse di competenza per area di influenza, in pratica ai carichi verticali che essa sopporta, e non dipenderanno dai rapporti di rigidezza laterale tra le varie pareti. Poiché in un edificio in muratura ordinario le pareti murarie rappresentano già di per se una parte significativa delle masse dell'edificio stesso, la capacità di ripartizione dell'impalcato in genere non è fortemente chiamata in causa, a meno di forti differenze di rigidezza delle pareti, ad esempio a causa della mancanza completa delle aperture in alcune pareti perimetrali.

Nei casi reali, comunque, non è semplice valutare la rigidezza effettiva dell'impalcato, né è facile conferire ad esso questa rigidezza qualora manchi, perché ciò richiede interventi notevolmente costosi ed invasivi.

Se, come caso limite, l'impalcato può essere considerato infinitamente rigido nel proprio piano è possibile utilizzare un modello spaziale globale dell'edificio, nel quale gli spostamenti dei diversi maschi murari sono mutuamente correlati a ciascun livello (perché il moto dell'impalcato è legato a soli tre gradi di libertà). Pertanto le forze orizzontali di piano, ovvero le accelerazioni corrispondenti alle masse, saranno fronteggiate in modo unitario da tutte le pareti disposte nella direzione delle forze e gli eventuali momenti torcenti di piano anche dalle pareti disposte nella direzione ad esse ortogonale.

All'estremo opposto (impalcato infinitamente deformabile), non ha senso l'utilizzo di un modello globale spaziale, in quanto la mancanza del vincolo globale di piano, comporta che ogni parete disposta nella direzione delle forze

frontergerà in maniera indipendente dalle altre le azioni di sua competenza ( proporzionali unicamente alle proprie masse ), mentre non possono esistere momenti torcenti di piano. In questo caso, quindi, sarà necessario analizzare ogni parete indipendentemente, cioè passare da un unico modello spaziale globale a tanti schemi piani quante sono le pareti.

Nei casi reali avremo, ovviamente, tutta una gamma di situazioni intermedie. Ad esempio, si può considerare,

- impalcato infinitamente deformabile e croci di muro delle pareti deboli, con conseguente assenza di azione ridistributrice e di capacità di collegamento; questa ipotesi corrisponde ad un edificio semiruderizzato con croci di muro lesionate ed ampie lacune negli impalcati, costituiti da solai semplicemente e precariamente appoggiati alle pareti;
- impalcato ancora infinitamente deformabile, come nel caso precedente, ma con affidabile integrità delle croci di muro, che consente alle pareti ortogonali al sisma di limitare il rischio di fenomeni fuori dal proprio piano scaricando con effetto arco nel piano orizzontale sulle pareti di controvento; questa ipotesi, che corrisponde a una situazione di degrado limitata ai soli solai, viene qui considerata per evidenziare l'importanza delle croci di muro;
- impalcato con deformabilità finita e dotato di catene lungo le pareti, apprezzabile capacità distributiva e di collegamento;
- impalcato infinitamente rigido con conseguente ridistribuzione dell'azione inerziale sulla base della sola rigidità delle pareti.
- Ai fini pratici può essere opportuno procedere, nei casi dubbi, seguendo un criterio di fascia e quindi, al limite, utilizzare modellazioni estreme (telaio spaziale globale e singole pareti indipendenti), considerando poi come capacità sismica dell'edificio la più bassa tra quelle ottenute.
- Nel seguito di questo capitolo il modello di telaio spaziale è ampiamente utilizzato per meglio evidenziare le differenze comportamentali legate alle differenti modellazioni, in modo da stimolare la curiosità e migliorare la comprensione anche fenomenologica del lettore. Si sottolinea però che l'uso di tale modello nella pratica professionale richiede accortezza e buona comprensione delle problematiche innanzi citate. Un uso

improprio del modello spaziale nel caso di impalcato infinitamente deformabile rischia infatti di portare a conclusioni fortemente fuorvianti. Ad esempio, effettuando l'analisi modale si troverebbero un numero elevatissimo di modi, ciascuno con massa partecipante estremamente bassa; una tale situazione sarebbe allarmante in presenza di impalcato rigido ( e non consentirebbe l'uso dell'analisi statica non lineare ), mentre in questo caso indica semplicemente che viene eccitata ogni volta una singola parete, la cui massa è solo una frazione di quella totale. Inoltre i primi modi corrisponderebbero sicuramente ad oscillazioni delle pareti come mensole fuori dal piano, mentre, come innanzi detto, il rischio di ribaltamento delle pareti deve essere sempre eliminato.

**Bibliografia di riferimento**

*"Edifici in muratura alla luce della nuova normativa sismica" di Pietro Lenza e Aurelio Ghersi*

*"Edifici in muratura Progettazione degli interventi post-sisma" di A.Lemme, A.Martinelli, S.Podestà*



## INDICAZIONE SULLA VULNERABILITÀ DEGLI EDIFICI

La vulnerabilità sismica consiste nella valutazione della propensione di persone, beni o attività a subire danni al verificarsi dell'evento sismico. Nell'ottica di un'analisi completa della vulnerabilità si pone il problema di individuare non solo i singoli elementi che possono collassare sotto l'impatto del sisma, ma anche di quantificare gli effetti che il loro collasso determina sul funzionamento del sistema territoriale.

La vulnerabilità sismica di un edificio è definita come descrittore sintetico delle caratteristiche strutturali che consente di determinare il grado di danno per un dato livello di [azione](#) e può essere quindi considerata come una misura della maggiore o minore propensione dell'edificio stesso a subire danni per effetto di un terremoto di assegnate caratteristiche. I rilievi, le prove e le indagini geologiche, geotecniche e strutturali sono finalizzati al completamento dei dati di riferimento per la messa a punto di un modello di valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici.

I progetti di ricostruzione dovranno, quindi, essere supportati dalle specifiche indagini geologiche, geotecniche e geofisiche previste dalla normativa vigente (NTC2008) per la caratterizzazione dei terreni di sedime. *Sondaggi* e *prove penetrometriche* sono finalizzati alla costruzione dei modelli geologici sito specifici e alla caratterizzazione geomeccanica dei terreni. In particolare le prove penetrometriche possono essere impiegate nelle aree del centro storico dove la logistica non consente l'esecuzione dei sondaggi, per caratterizzare i depositi superficiali. Le *prove sismiche a rifrazione* sono importanti per definire gli assetti stratigrafici locali. Lo stesso dicasi per le *tomografie elettriche*, idonee ad evidenziare la geometria di eventuali cavità. A tale scopo può essere utilmente impiegato anche il *georadar*. Le *prove sismiche di tipo Masw* servono per assegnare la classe sismica ai terreni di fondazione. Per la frequenza naturale di vibrazione dei terreni si utilizzano le *indagini tomografiche*. E' auspicabile, inoltre, in fase di ricostruzione realizzare, dove possibile, dei sondaggi attrezzati a *down hole* per determinare con buona precisione le caratteristiche sismiche dei terreni presenti nell'area.

I terreni perimetrati dal PdR ricadono in *zona stabile suscettibile di amplificazione locale* negli studi di microzonazione condotti nell'area. Gli strati più superficiali dei terreni possono modificare in maniera sostanziale l'onda sismica che sale in superficie determinando differenti caratteristiche del moto del suolo a contatto con la struttura, sia per intensità (amplificazione), che per contenuto in frequenza (forma spettrale). Il problema è, in generale, molto complesso e sono necessarie indagini e studi approfonditi per arrivare a definire in maniera affidabile le caratteristiche e l'entità degli effetti di amplificazione locale. A determinare tali effetti contribuiscono sia la morfologia superficiale (effetti topografici) sia la morfologia degli strati sotterranei sia, spesso in maniera preponderante, la natura dei terreni di fondazione. La quantificazione degli effetti di amplificazione richiede la conoscenza della geologia di superficie e delle caratteristiche geomeccaniche e sismiche dei terreni.

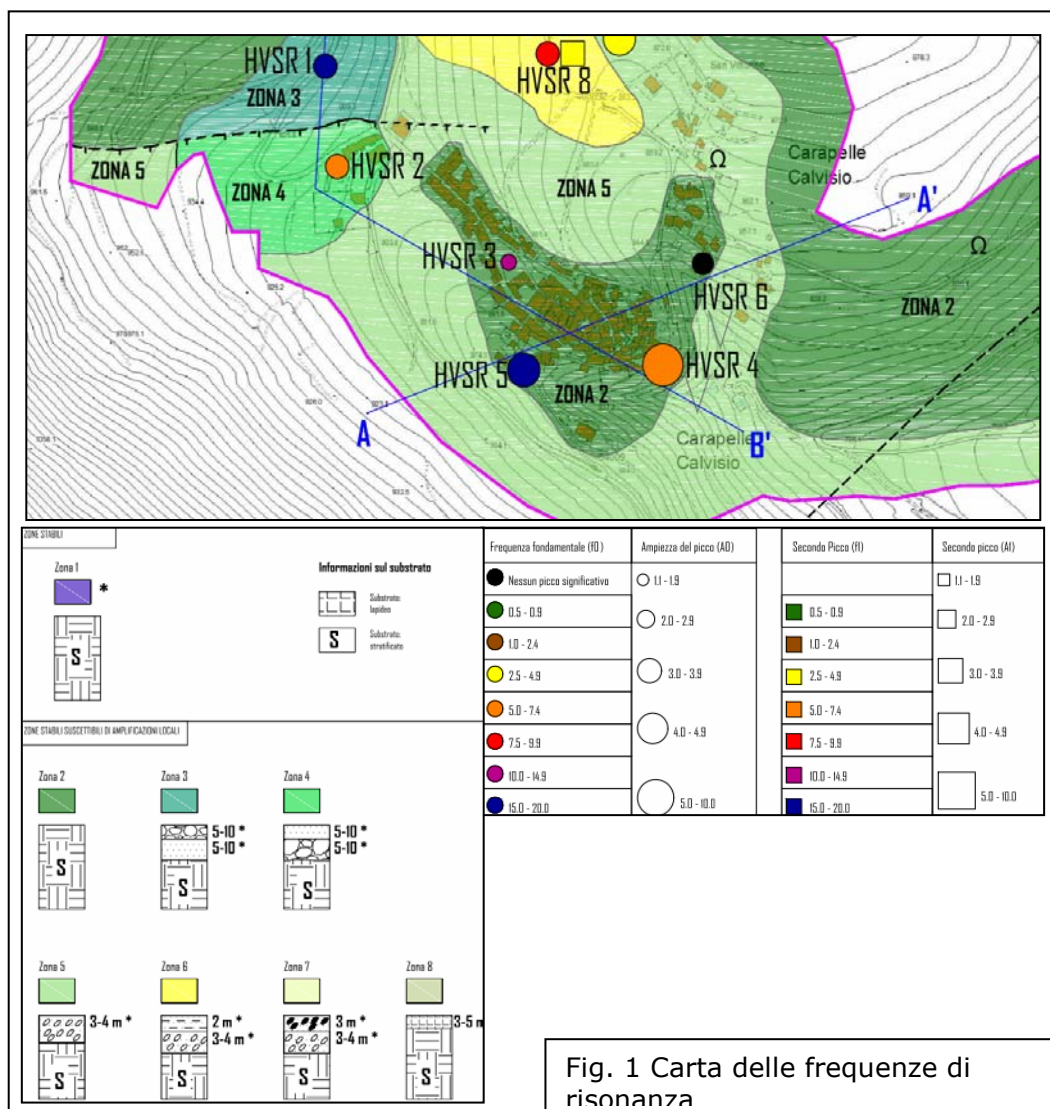
La categoria del suolo, le caratteristiche geotecniche dei terreni e i parametri dello spettro di risposta elastico, sia della componente verticale sia della componente orizzontale, concorrono alla costruzione del modello di risposta sismica, ossia il modello che definisce il moto sismico di un punto della superficie del suolo. Lo spettro di risposta elastico è la forma spettrale (spettro normalizzato), indipendente dal livello di sismicità, che moltiplicata per il valore di accelerazione massima del terreno ( $a_g$ ) caratterizza il sito. La determinazione dello spettro elastico consente di ottenere l'azione sismica di progetto, che viene poi combinata con le altre azioni, permanenti e variabili, agenti sulle strutture degli edifici.

La vulnerabilità degli edifici è funzione anche dei seguenti fattori, che andranno attentamente indagati in fase di ricostruzione:

- amplificazione topografica (NTC 2008, Tab.3.2.VI);
- grado di fratturazione dei calcari e presenza di cavità;
- danni preesistenti;
- cedimenti fondali;
- frequenze di vibrazione dei terreni in risonanza con le frequenze di vibrazione degli edifici.

Dalla Carta delle frequenze di risonanza di MZS, scala 1:5000, risulta che l'area di interesse è ubicata nella zona 2, *zona stabile suscettibile di amplificazione locale* (Fig.1):

- nella parte settentrionale dell'Ambito B-breve termine, le frequenze di risonanza del terreno presentano  $F_0$  (Hz) = 10.0-14.9 e  $A_0$  = 1.0-1.9;
- nella parte meridionale dell'Ambito B-Breve Termine, le frequenze di risonanza del terreno presentano  $F_0$  (Hz) = 15.0-20.0 e  $A_0$  = 4.0-4.9;
- nella parte meridionale dell'Ambito A-Lungo Termine, le frequenze di risonanza del terreno presentano  $F_0$  (Hz) = 5.0-7.4 e  $A_0$  = 5.0-10.0.



## **INDICAZIONE PER LA PREVENZIONE E LA RIDUZIONE DEI RISCHI IDROGEOLOGICI E GEOTECNICI**

### ***Rischio idrogeologico***

Il rischio idrogeologico corrisponde agli effetti indotti sul territorio dal superamento dei livelli pluviometrici critici lungo i versanti, dei livelli idrometrici dei corsi d'acqua della rete idrografica minore e di smaltimento delle acque piovane. Le condizioni atmosferiche, in tutti i loro aspetti, influenzano profondamente le attività umane; in alcuni casi i fenomeni atmosferici assumono carattere di particolare intensità e sono in grado di costituire un pericolo, cui si associa il rischio di danni anche gravi a cose o persone.

La VALUTAZIONE DEL RISCHIO costituisce la prima misura di prevenzione. Tale valutazione deve tenere conto del contesto ambientale e dei processi agenti e può essere riassunta nei seguenti passaggi:

- *Individuazione delle sorgenti di pericolo;*
- *Individuazione dei soggetti esposti;*
- *Stima Del Rischio;*
- *Scelta degli interventi.*

La finalità principale della valutazione del rischio è quella di determinare se le misure di prevenzione adottate siano adeguate o meno, in modo tale da controllare i rischi prima che si verifichi il danno.

L'area d'interesse è ubicata sulla sommità di una dorsale, il contesto è a medio alta permeabilità, la falda è profonda, sono assenti acque superficiali, i versanti sono intensamente vegetati, l'assetto urbanistico, complessivamente, non è di recente realizzazione. Tali elementi fanno propendere per una valutazione del rischio idrogeologico molto bassa. Ciò non di meno va realizzata e mantenuta una rete fognaria in grado di allontanare le acque derivanti da piogge particolarmente intense, quali quelle che possono essere generate dalla congiuntura climatica attuale, che tende a concentrare le precipitazioni in intervalli temporali molto ristretti. Infatti la presenza di acque non regimentate all'interno del tessuto urbanizzato costituisce un elemento di innesco del rischio geotecnico.

## ***Rischio geotecnico***

Il rischio geotecnico è generato dall'inadeguatezza delle strutture edificate rispetto alle caratteristiche dei terreni di fondazione. Il terreno di fondazione del centro storico di Carapelle C. presenta generalmente caratteristiche geotecniche buone se non ottime. Tale valutazione positiva non deve portare a sottovalutare alcune criticità che possono essere assai significative a livello del singolo intervento.

*Carenza fondale.* La maggior parte degli edifici sono stati realizzati in epoca storica con sbancamenti a mano. Il piano d'imposta delle fondazioni, pertanto, in genere è poco profondo, lo sbancamento si fermava appena il terreno aumentava di consistenza, e le fondazioni generalmente erano realizzate a sacco. Gli interventi si sono succeduti nel tempo su porzioni del medesimo aggregato con metodologie costruttive, materiali e profondità di posa differenti. Gli apparecchi fondali, pertanto, si possono presentare poco radicati, disomogenei e nel complesso "delicati". E' necessario risolvere tale problematica in fase di ricostruzione.

*Disomogeneità del piano di posa.* I piani di fondazione sono stati realizzati in tempi e fasi economiche diversi, pertanto, non necessariamente sono ubicati alla stessa profondità e secondo gli stessi criteri. Questo può comportare che un edificio o un gruppo di edifici interagenti trasmettono i carichi su terreni con rigidità nettamente differente, p. es. francamente litoidi e di alterazione. In tal caso un evento sismico significativo può generare un danno derivante dalle diverse interazioni fra struttura e terreno fondale. Tale problematica va attentamente analizzata ed eventualmente risolta con interventi sulle fondazioni in fase di ricostruzione.

*Cedimento differenziale.* La disomogeneità del piano di posa e/o la modalità di trasmissione dei carichi possono generare dei cedimenti differenziali che hanno effetti molto negativi in particolare sulle strutture in muratura. Indizi di tale fenomenologia dissestante si possono rilevare sul terreno o possono essere desunti dalla morfologia e assetto delle fratture. Tale problematica va attentamente analizzata ed eventualmente risolta con interventi sulle fondazioni in fase di ricostruzione.

Cavità. Al di sotto degli edifici possono essere presenti cavità antropiche utilizzate inizialmente per l'estrazione di inerti, successivamente per il ricovero di animali e la conservazione di derrate alimentari. Tali cavità costituiscono una criticità in particolare quando sormontate da elementi strutturali portanti. A volte interessano diverse proprietà pubbliche e private. Gli strumenti principali d'indagine sono la tomografia elettrica e il georadar. Quando individuate, vanno definiti i rapporti con strutture ed infrastrutture soprastanti e, ove necessario, messe in sicurezza.