



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE



**Università degli Studi di Trieste
Dipartimento di Ingegneria e Architettura**

**Corso di
Progetto di Strutture – Modulo 2**

COSTRUZIONI ESISTENTI IN MURATURA

Prof. Ing. Natalino Gattesco

BIBLIOGRAFIA

- **AA.VV., “Manuale delle murature storiche Vol. I e Vol. II”, Dei, 2011**
- **Croci G., “Conservazione e restauro strutturale dei beni architettonici”, UTET, Torino, 2001.**
- **Hendry A.W. (1986) “Statica delle strutture in muratura di mattoni”, Patron Editore, Bologna.**
- **Tomazevic M. (2001) “Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings”, Series on Innovation in Structures and Construction – Vol. 1, Imperial College Press, London.**
- **DM 17.01.2018 – Nuove norme tecniche per le costruzioni**
- **Circolare 21.01.2019, n. 7/C.S.LL.PP. – Circolare esplicativa NTC2018**
- **D.P.C.M. 09.02.2011- Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. del 14.01.2008**

INTRODUZIONE

La **sicurezza** di una struttura può 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 funzionalità**, 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.)

CROLLO PONTE MORANDI - GENOVA



Viadotto sul Polcevera – Genova (ago. 2018)

CROLLO TETTO CHIESA - ROMA



Chiesa di San Giuseppe dei Falegnami – Roma (ago. 2018)

CROLLO EDIFICIO – TORRE ANNUNZIATA



Crollo durante la notte (luglio 2017) – 8 morti (*fam. tecnico comunale*)

CROLLO SCUOLA – SAN GIULIANO DI PUGLIA



Crollo scuola Jovine (*ottobre 2002*) – 28 morti

CROLLO TORRE CIVICA – PAVIA



Crollo Torre Civica (marzo 1989)

CROLLO EDIFICIO RIONE ARENELLA – NAPOLI



CROLLO COPERTURA PISCINA AQUAMARINA TS

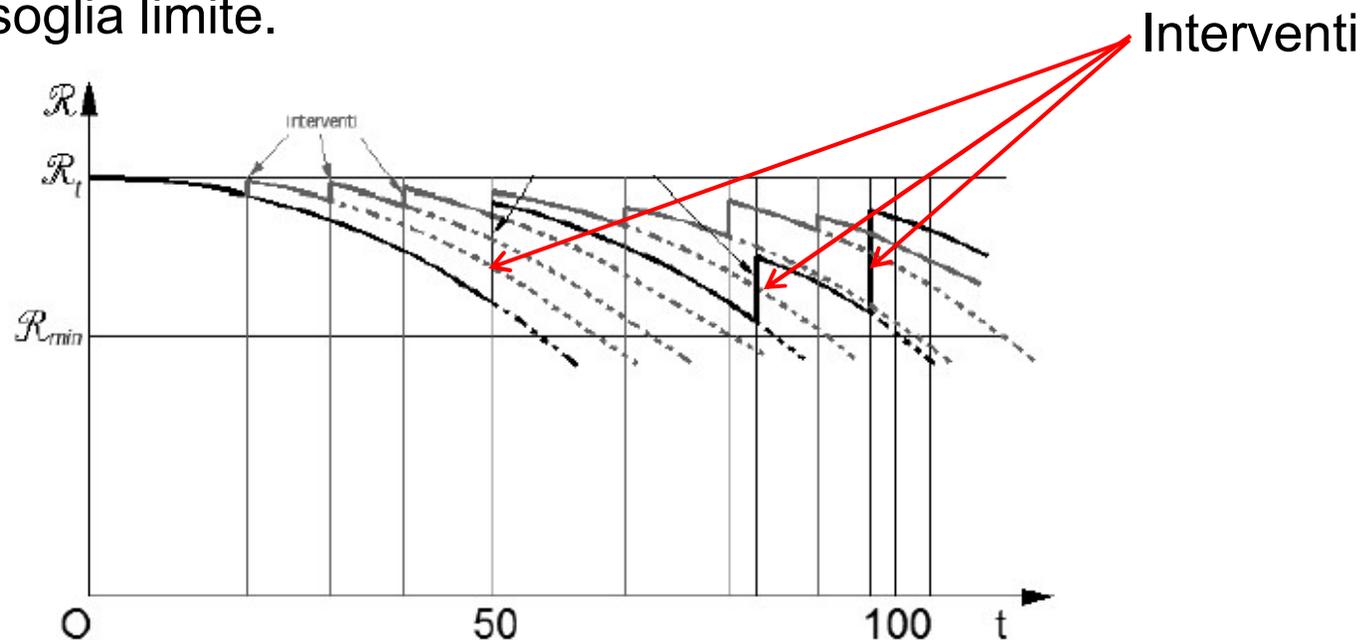


VERIFICA PERIODICA

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, può essere seriamente ridotta da eventi quali

- I terremoti
- Gli smottamenti
- Le esplosioni

Questi eventi provocano danni più 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 è necessario intervenire con opere di riparazione e/o rafforzamento

MESSA IN SICUREZZA

INDAGINE CONOSCITIVA

Lo scopo degli interventi di riparazione e rafforzamento strutturale è di conferire alle strutture di edifici esistenti un livello di sicurezza adeguato alla funzione

Per ricercare il metodo di intervento più idoneo è 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, sonda Windsor, carotaggi, termografia, endoscopia, ecc.*)
- Rilievo del quadro fessurativo (*diretto, fotogrammetrico*) con mappatura di ogni singola lesione (*apertura, estensione*)

DIAGNOSTICA

Alla fase di indagine conoscitiva segue una fase di

DIAGNOSTICA PER IL RECUPERO

che consiste nell'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.*) per permettere di scegliere

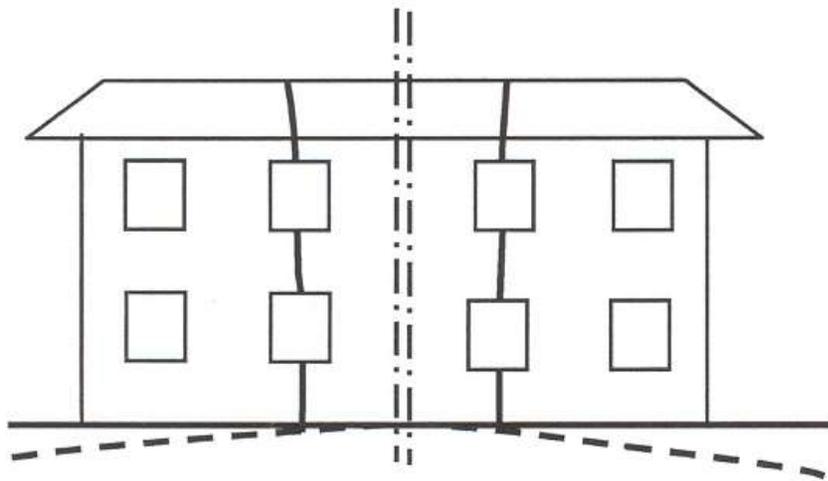
INTERVENTO STRUTTURALE PIU' ADEGUATO

TECNICHE DI INTERVENTO

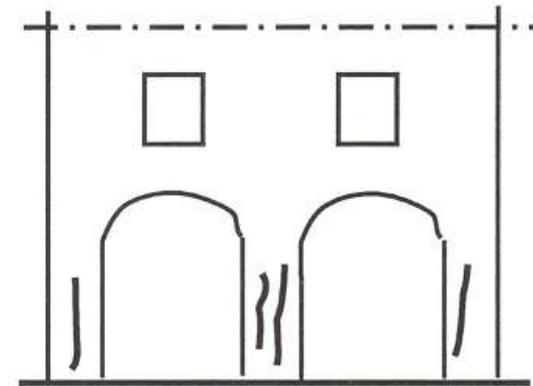
- **Gli interventi strutturali possono essere**
 - Locali (*riguardano opere su singoli elementi strutturali mirate principalmente al miglioramento delle caratteristiche meccaniche dei materiali*)
 - Globali (*riguardano opere che tendono a modificare il funzionamento dell'intera struttura*)
- **E' necessario 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)



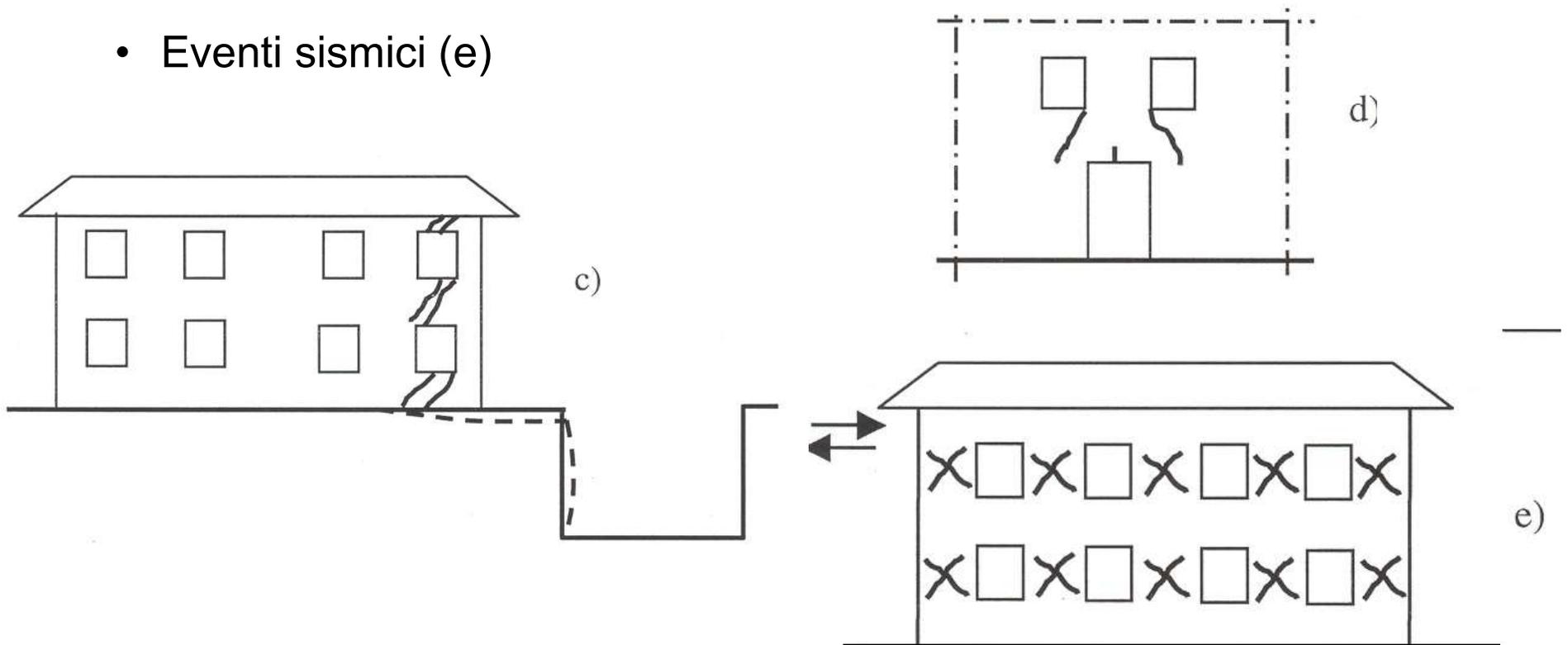
a)



b)

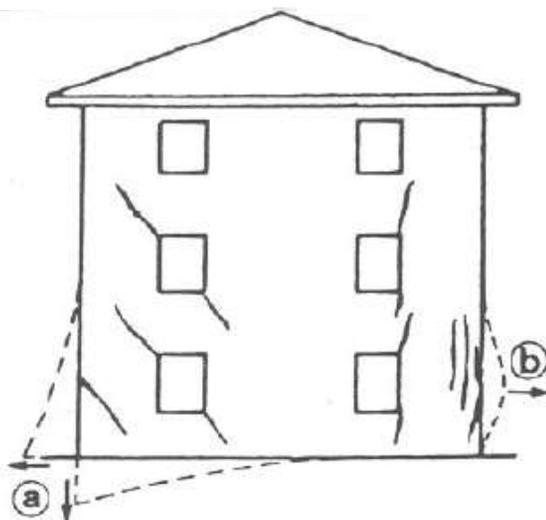
CONSIDERAZIONI SULLE MURATURE

- **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)



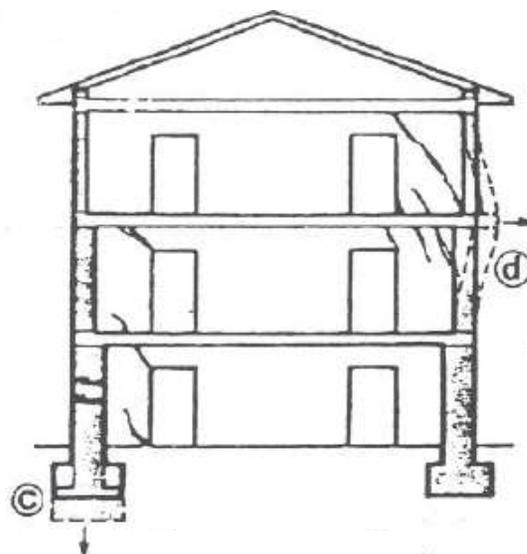
FESSURE E DEFORMAZIONI COME INDICATORI

- Quadri fessurativi provocati da cedimenti e spinte

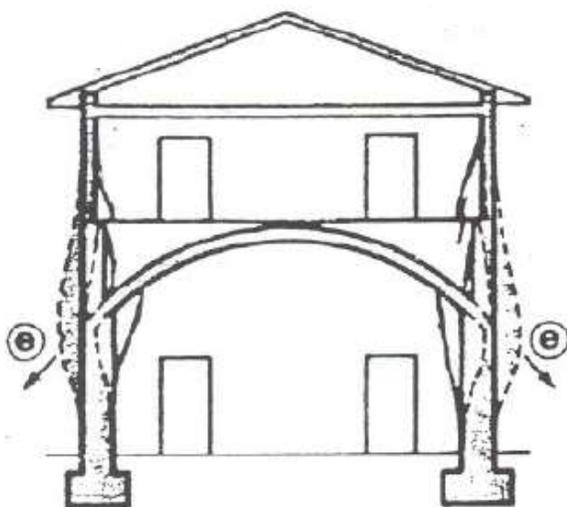


Lesioni tipiche dovute a spostamenti localizzati:

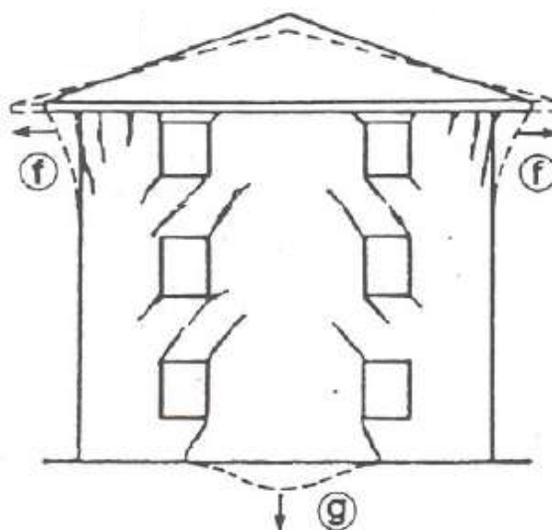
- a) per spostamento laterale dello spigolo dell'edificio;
- b) per schiacciamento della struttura muraria;



- c) per cedimento fondale della parete di facciata;
- d) per spinta verso l'esterno delle strutture di solaio;



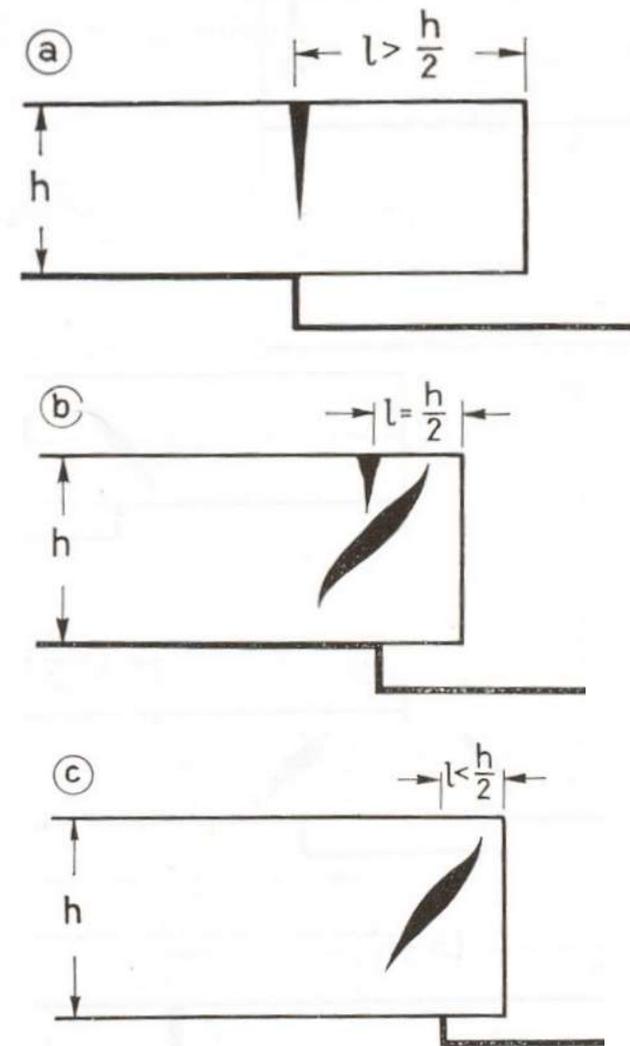
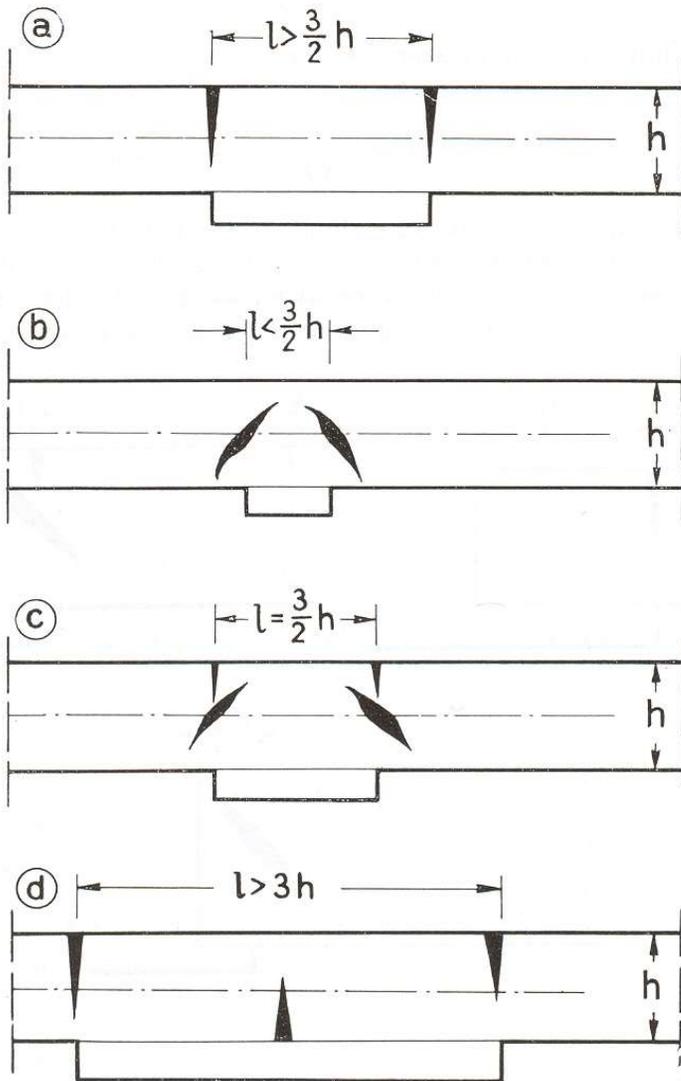
- e) per effetto di spinta della struttura a volta interna;



- f) per presenza di copertura spingente;
- g) per cedimento fondale nella zona intermedia di facciata.

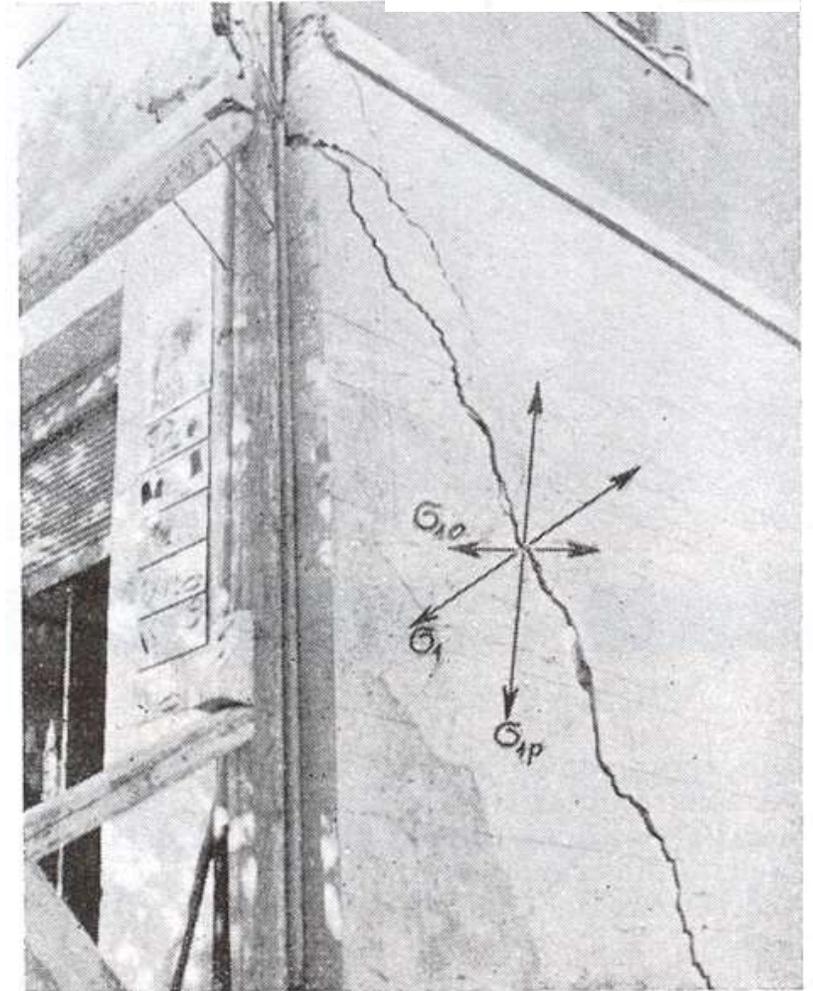
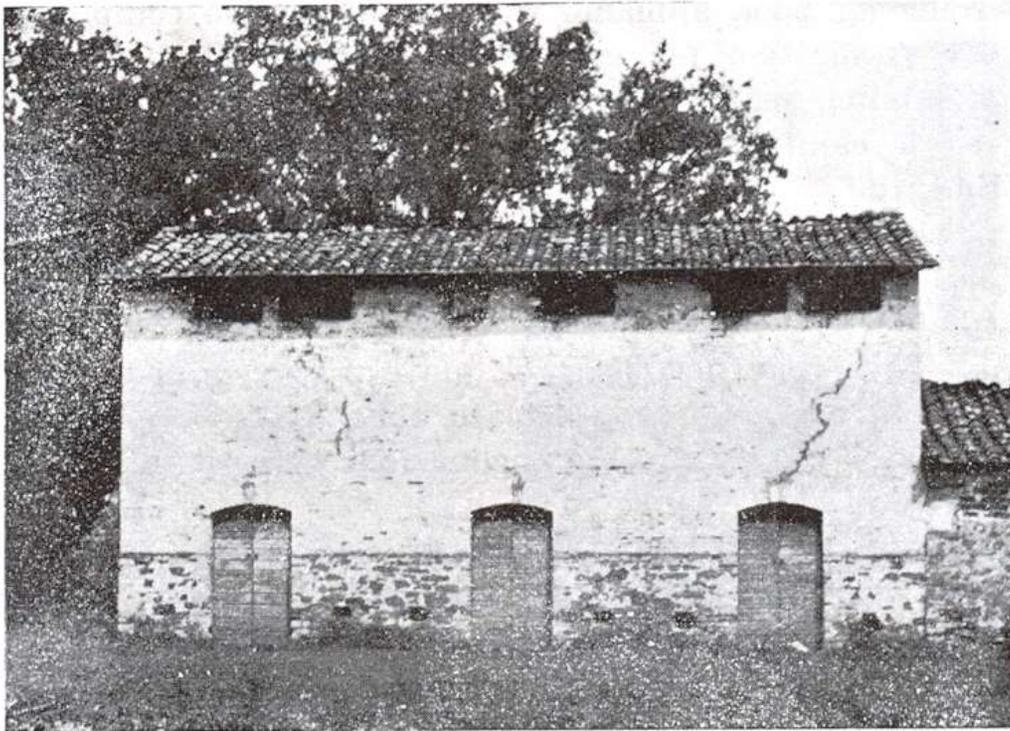
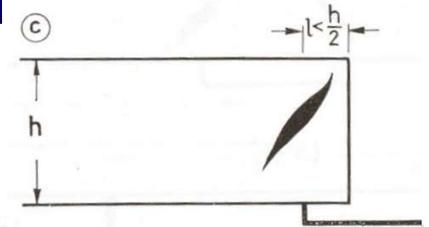
FESURE COME INDICATORI

- Quadri fessurativi provocati da cedimenti verticali



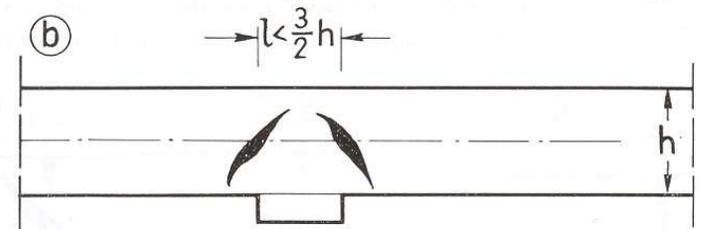
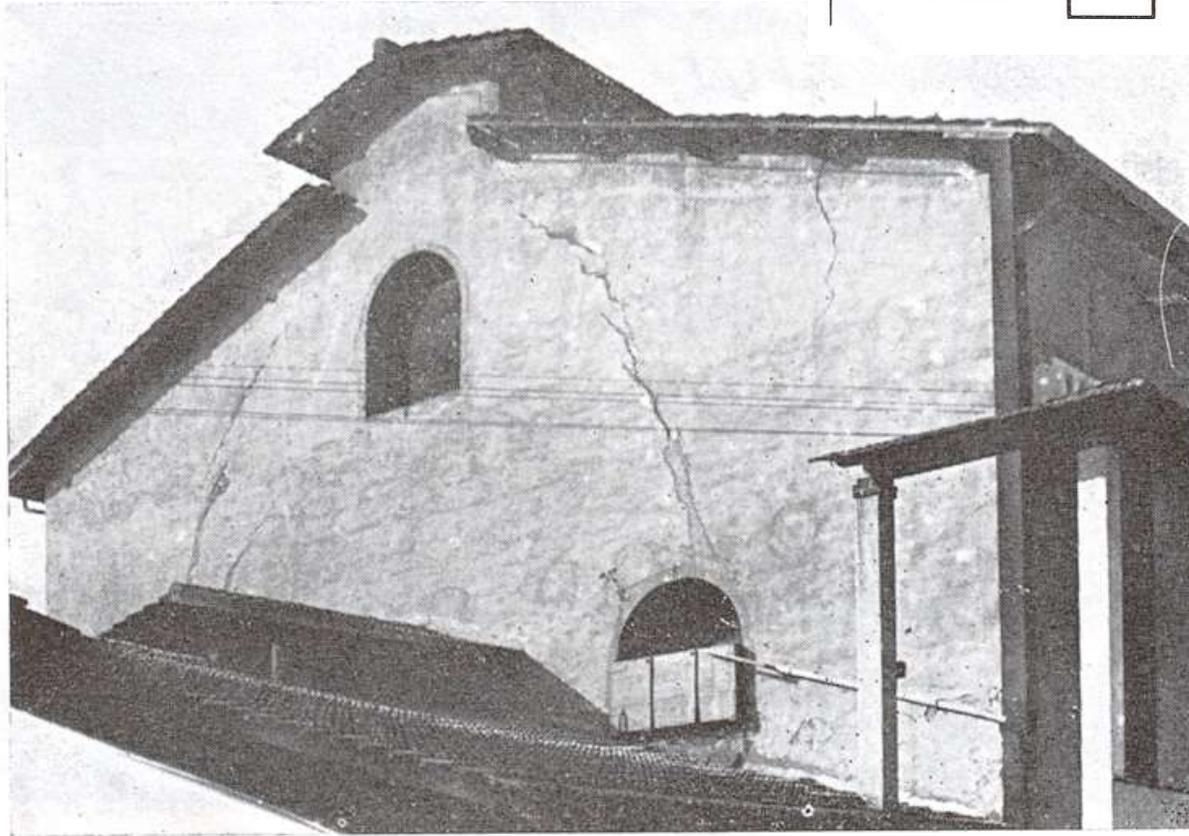
FESURE COME INDICATORI

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



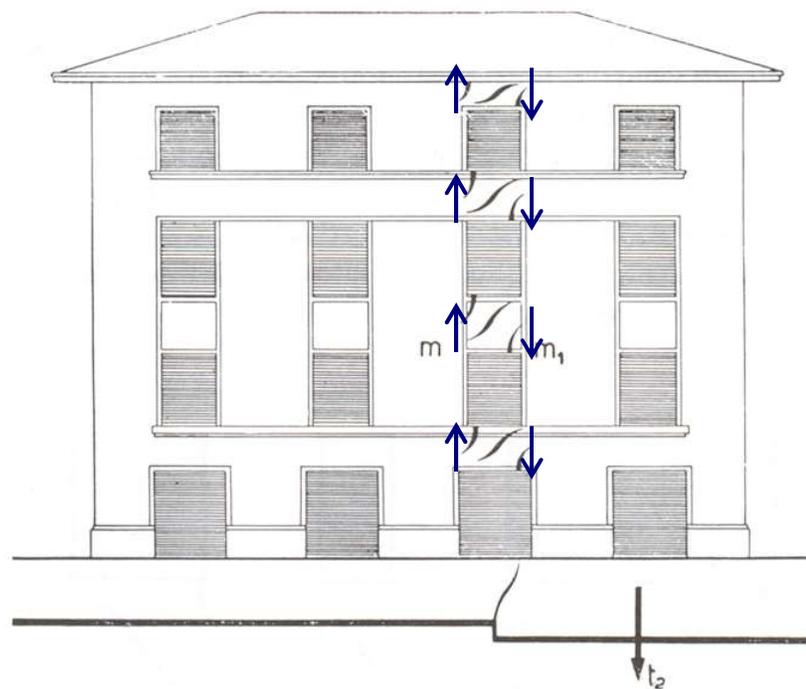
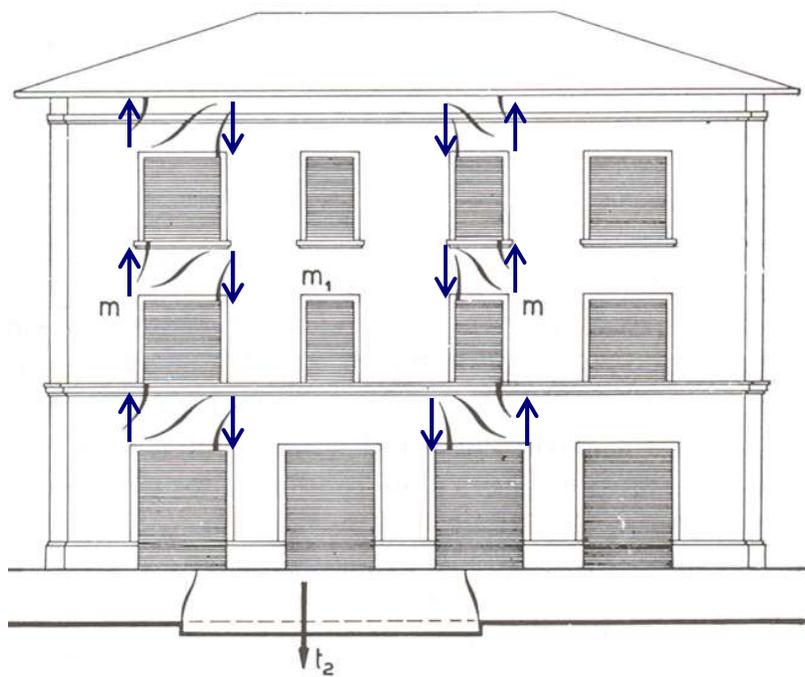
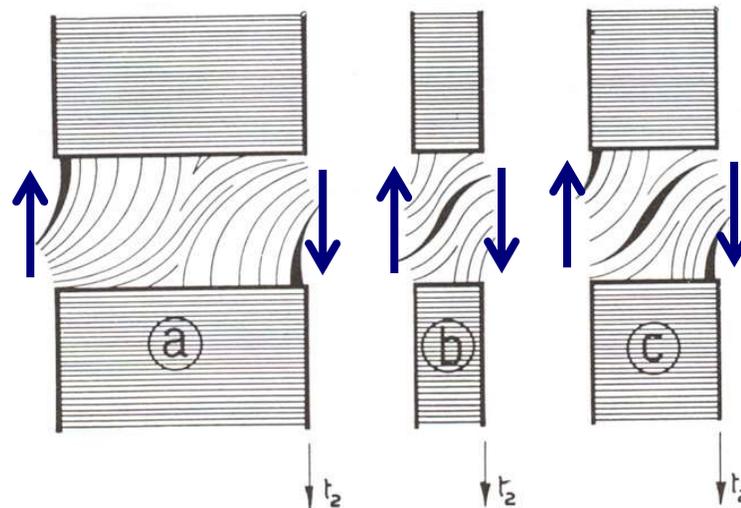
FESSURE COME INDICATORI

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



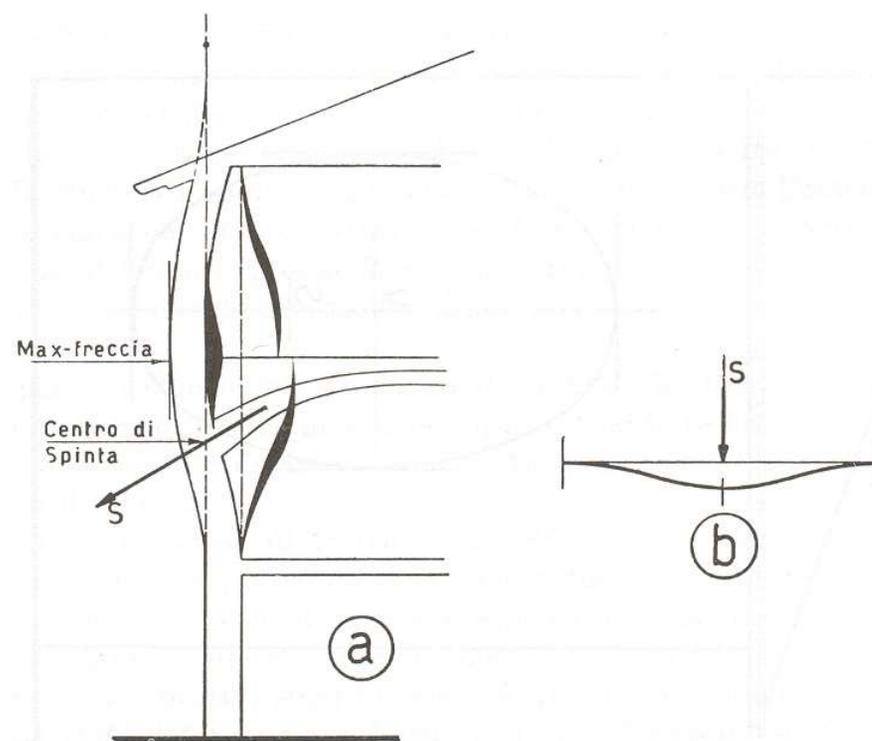
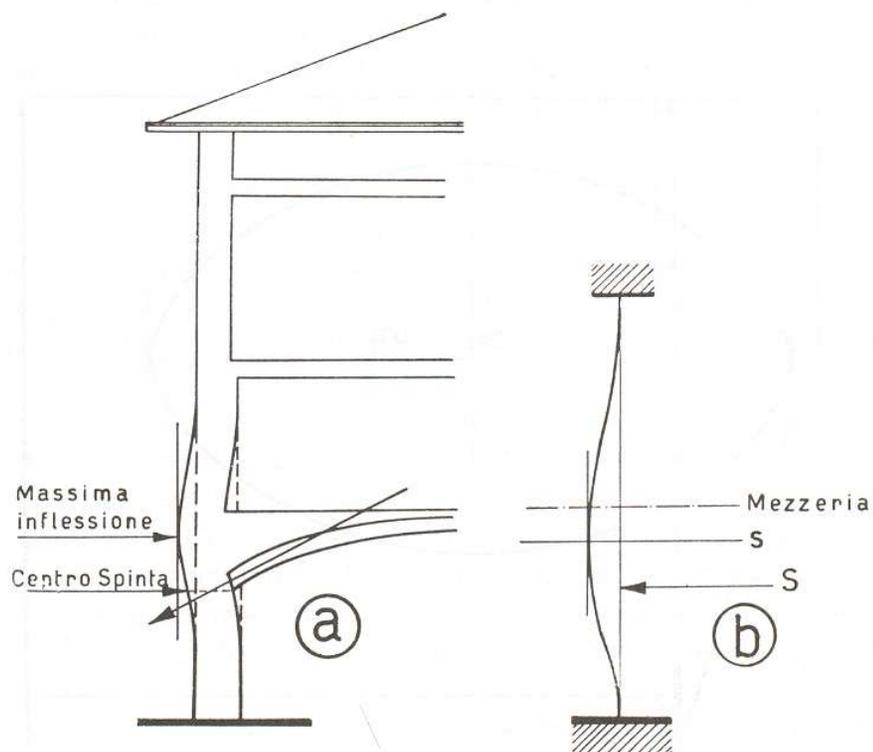
FESSE COME INDICATORI

- Quadri fessurativi provocati da cedimenti verticali (nel caso di traverse più deboli dei maschi)



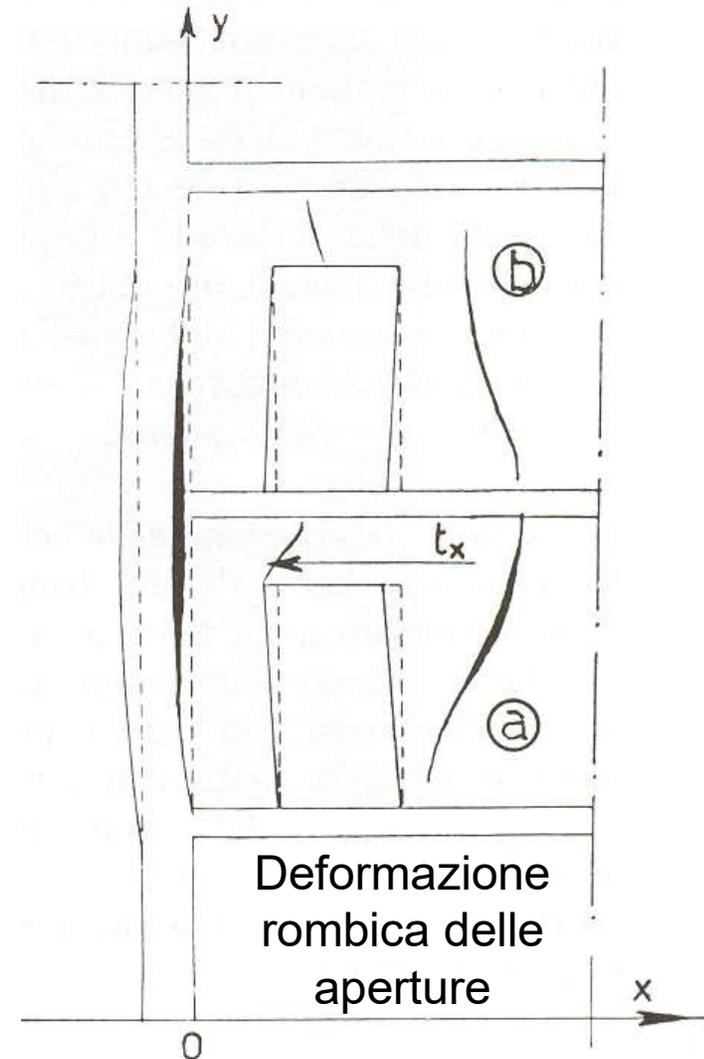
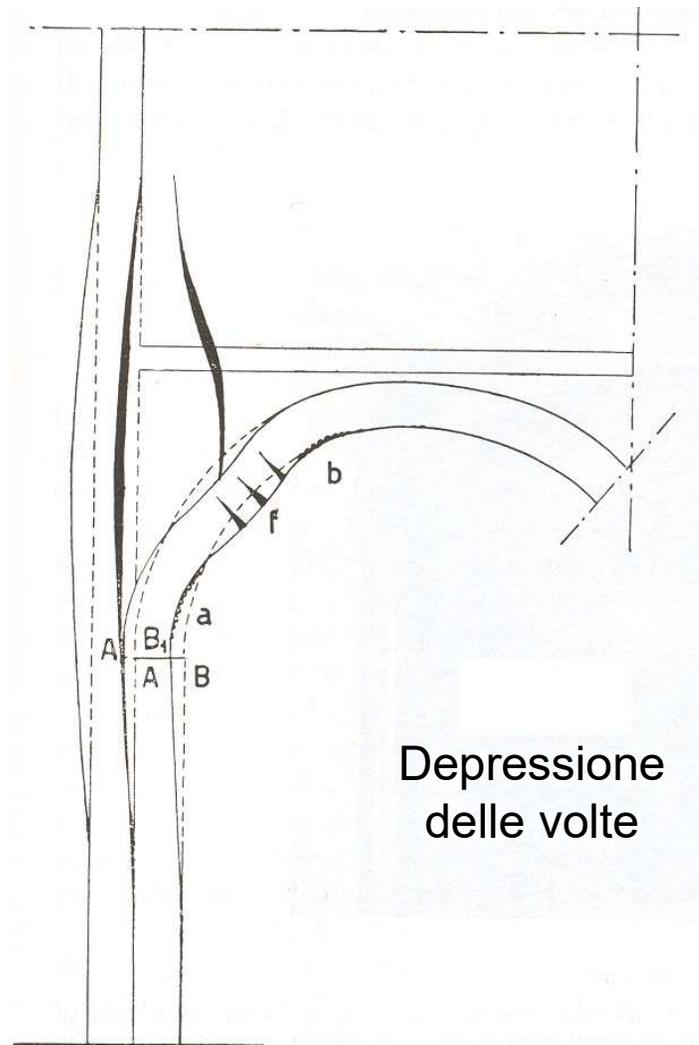
FESSURE E DEFORMAZIONI COME INDICATORI

- Quadri fessurativi provocati da spinte di archi e volte



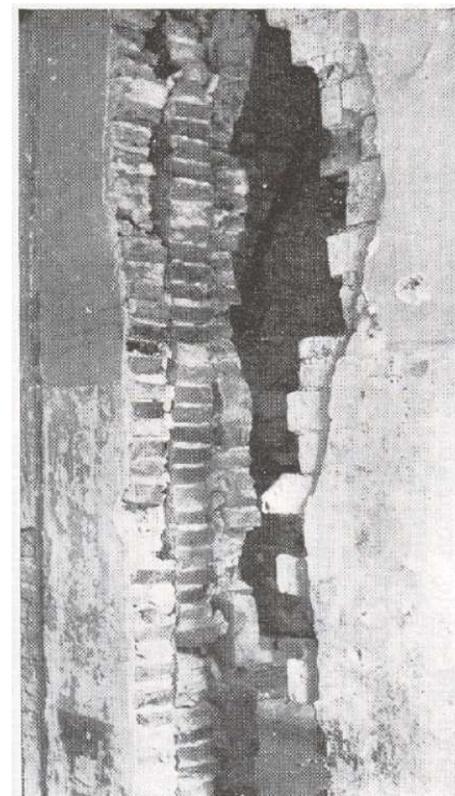
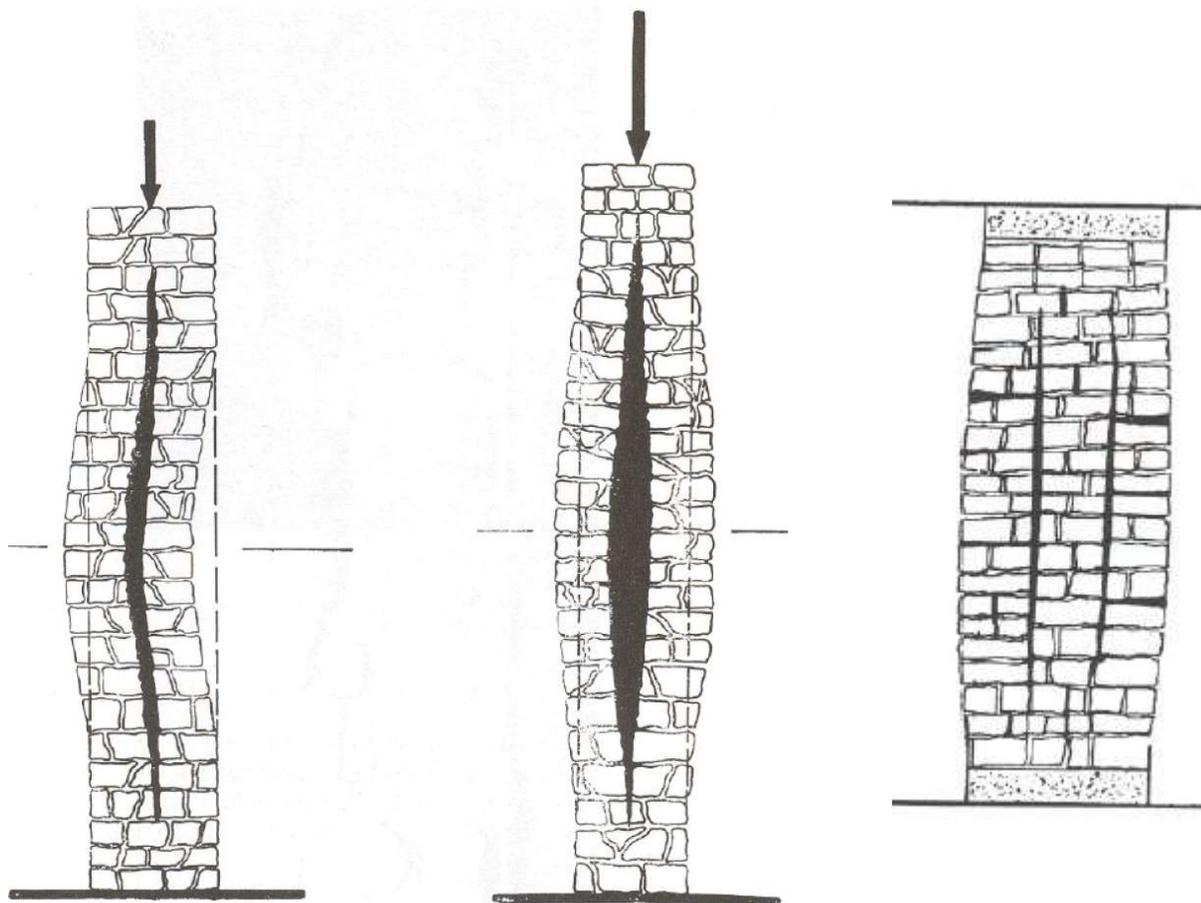
FESSURE E DEFORMAZIONI COME INDICATORI

- Quadri fessurativi provocati da spinte di archi e volte



FESSURE E DEFORMAZIONI COME INDICATORI

- Quadri fessurativi nel piano della muratura



CARICO CRITICO MURATURE

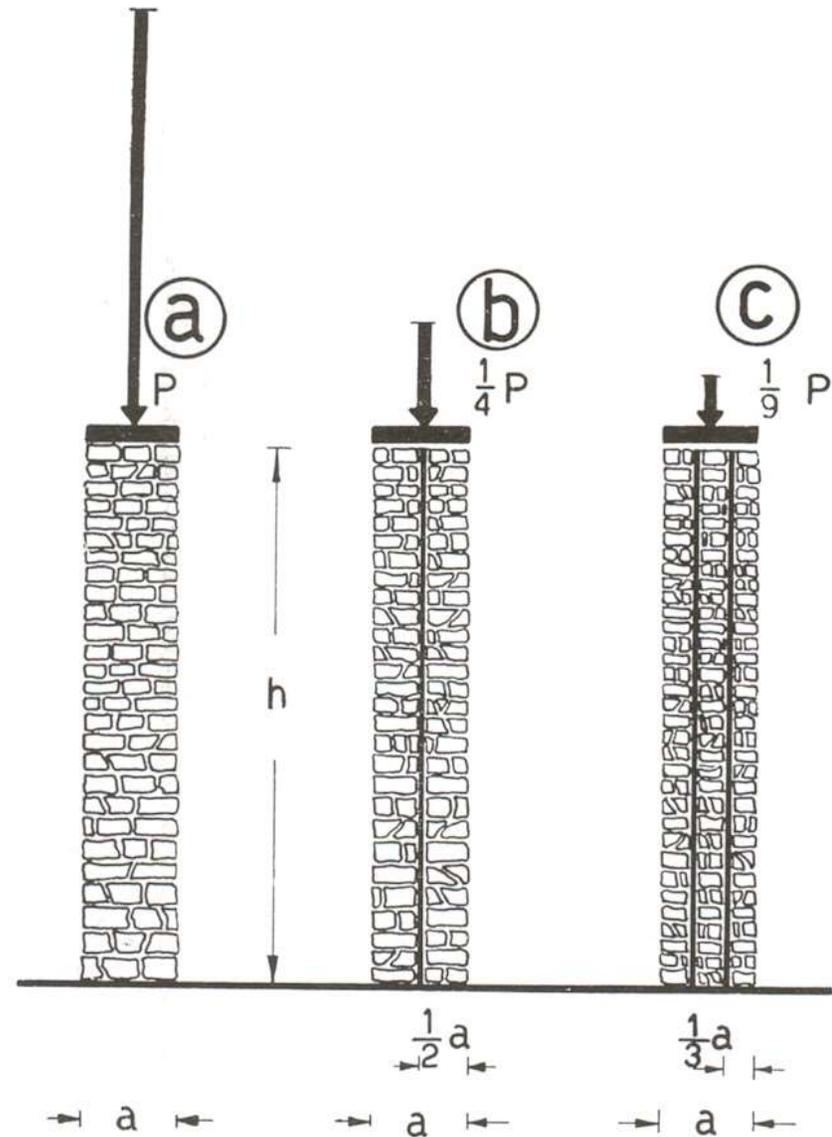
- **Muratura a più paramenti** (*Carico critico*)

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:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2}{12} \cdot \frac{E a^3}{I_o^2}$$

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

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



EDIFICI ESISTENTI

Gli edifici esistenti si distinguono da quelli di nuova progettazione per gli aspetti seguenti:

- **il progetto riflette lo stato delle conoscenze al tempo della loro costruzione**
- **Il progetto può contenere difetti di impostazione progettuale e di realizzazione non immediatamente visibili**
- **Spesso l'esecuzione dell'opera non è preceduta da una fase di progettazione degli elementi strutturali (edilizia popolare)**
- **Tali edifici possono essere stati soggetti a terremoti passati e ad altre azioni accidentali che non sono manifesti.**

EDIFICI ESISTENTI

Nella definizione dei modelli strutturali si deve tener conto che:

- **La geometria e i dettagli costruttivi sono definiti e la loro conoscenza dipende dalla documentazione disponibile e dal livello di approfondimento delle indagini conoscitive.**
- **La conoscenza delle proprietà meccaniche dei materiali dipende solo dalla omogeneità dei materiali stessi nell'opera e dal livello di approfondimento delle indagini e loro affidabilità.**
- **I carichi permanenti sono definiti e la loro conoscenza dipende dal livello di approfondimento delle indagini conoscitive.**

Di conseguenza la valutazione della sicurezza ed il progetto degli interventi sono normalmente affetti da un grado di incertezza diverso da quello degli edifici nuovi.

CONFIDENZA E ANALISI

E' quindi necessario utilizzare adeguati fattori di confidenza nelle verifiche di sicurezza e metodi di analisi e di verifica dipendenti dalla completezza e dall'affidabilità dell'informazione disponibile.

Negli edifici esistenti le situazioni riscontrabili sono le più diverse ed è quindi impossibile prevedere regole specifiche e dettagliate per tutti i casi.

Quanto contenuto nelle norme riguardanti gli edifici esistenti costituisce un riferimento generale che può essere integrato, in casi particolari, da valutazioni specifiche ed anche alternative da parte del progettista.

Comunque, anche in questi casi particolari, il progettista non è esonerato dal far precedere alla progettazione una sufficiente conoscenza dell'oggetto su cui va a operare.

VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi sulle costruzioni esistenti potranno essere eseguiti con riferimento ai soli SLU (*in genere SLV*) (*per CU IV necessarie anche verifiche SLE*).

Le costruzioni esistenti devono essere sottoposte a valutazione della sicurezza quando ricorre anche una sola delle seguenti situazioni:

- **Riduzione evidente della capacità resistente e/o deformativa della struttura o di alcune sue parti dovuta a**
 - **azioni ambientali (*sisma, vento, neve e temperatura*),**
 - **significativo degrado delle caratteristiche meccaniche dei materiali**
 - **azioni eccezionali (*urti, incendi, esplosioni*)**
 - **situazioni di funzionamento ed uso anomalo**
 - **deformazioni significative imposte da cedimenti del terreno.**

VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

Le costruzioni esistenti devono essere sottoposte a valutazione della sicurezza quando ricorre anche una sola delle seguenti situazioni:

- **Provati gravi errori di progetto o di costruzione**
- **Cambio della destinazione d'uso della costruzione o di parti di essa, con variazione significativa dei carichi variabili e/o della classe d'uso della costruzione**
- **Interventi non dichiaratamente strutturali, qualora essi interagiscano, anche solo in parte, con elementi aventi funzione strutturale e ne riducano la capacità o ne modifichino la rigidità.**
- **Quando si eseguano interventi strutturali (*adeguam, miglior., ripar.*)**
- **Opere realizzate in assenza di concessione o in difformità alle norme vigenti.**

VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

Se le circostanze citate riguardano porzioni limitate della costruzione, la valutazione può essere limitata agli elementi interessati ed a quelli con essi interagenti, tenendo presente la loro funzione nel complesso strutturale.

La valutazione della sicurezza deve permettere di stabilire se:

- **L'uso della costruzione possa continuare senza interventi**
- **L'uso debba essere modificato (*declassamento, cambio di destinazione, imposizione di limitazioni e/o cautele nell'uso*)**
- **sia necessario procedere ad aumentare o ripristinare la capacità portante.**

La valutazione della sicurezza è necessaria ogni volta che si eseguono interventi strutturali e si dovrà determinare il livello di sicurezza prima e dopo l'intervento.

VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

La valutazione della sicurezza deve essere effettuata in rapporto a quella richiesta per gli edifici nuovi. Si definiscono i seguenti parametri

ζ_E Rapporto tra l'azione sismica sopportabile dalla struttura e l'azione sismica che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione espresso in termini di accelerazione al piede.

$\zeta_{v,i}$ Rapporto tra il valore massimo del sovraccarico verticale sopportabile dall'i-esima parte della costruzione ed il valore del sovraccarico verticale che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione.

Devono essere previste restrizioni nell'uso quando risultano parti che non sopportano le azioni verticali di progetto.

L'inadeguatezza nei confronti delle azioni sismiche richiede la programmazione dell'intervento (*gravità, pubblica incolumità, risorse*).

CLASSIFICAZIONE DEGLI INTERVENTI

Si individuano le seguenti categorie di intervento:

- **Interventi di adeguamento** (*atti a conseguire i livelli di sicurezza previsti al §8.4.3 delle NTC 2018*)
- **Interventi di miglioramento** (*atti ad aumentare la sicurezza strutturale esistente, pur senza necessariamente raggiungere i livelli richiesti al §8.4.3 delle NTC 2018*)
- **Interventi di riparazioni o locali che interessano elementi isolati** (*che comunque non riducano le condizioni di sicurezza preesistenti*)

Per gli edifici di interesse storico è in ogni caso possibile limitarsi ad interventi di miglioramento (D.P.C.M. 09.02.2011 - Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. del 14.01.2008)

INTERVENTO DI ADEGUAMENTO

E' obbligatorio eseguire valutazioni di sicurezza e di effettuare interventi di adeguamento a chiunque intenda:

- a. Sopraelevare la costruzione*
- b. Ampliare l'edificio mediante opere ad esso strutturalmente connesse e tali da alterarne significativamente la risposta*
- c. Apportare variazioni di destinazione d'uso che comportino incrementi dei carichi globali verticali in fondazione superiori al 10%*
- d. Effettuare interventi strutturali che portano ad un organismo edilizio diverso dal precedente*
- e. Apportare modifiche di classe d'uso che conducano a costruzioni di classe III ad uso scolastico o di classe IV*

Nei casi c) ed e) si può assumere per l'indice di sicurezza sismica un valore $\zeta_E^a \geq 0.8$, per gli altri casi deve essere $\zeta_E^a \geq 1.0$

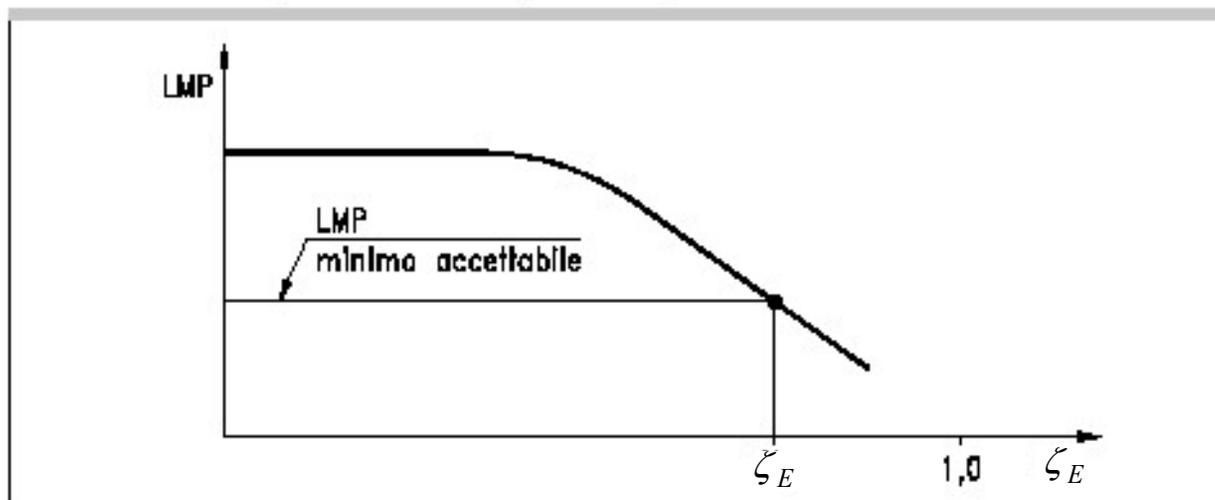
Indice di sicurezza sismica $\zeta_E = \frac{PGA_D}{PGA_R}$ Resistenza in termini di accelerazione
Domanda in termini di accelerazione

EDIFICI DI IMPORTANZA ARTISTICA

E' consentito derogare dall'obbligo dell'adeguamento, qualora ciò comporti l'esecuzione di opere incompatibili con le esigenze di tutela e conservazione del bene culturale

In tal caso, comunque, è richiesto di calcolare i livelli di accelerazione del suolo corrispondenti al raggiungimento di ciascuno stato limite previsto per la tipologia dell'edificio, nella situazione precedente e nella situazione successiva all'eventuale intervento.

LMP Livello delle prestazioni raggiunte dal monumento tenendo conto dell'integrità architettonica, della reversibilità e della durabilità dell'intervento strutturale scelto. (Si possono avere valori più alti del coefficiente ζ_E in pesanti interventi che risultano però inaccettabili dal punto di vista delle prestazioni)



INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO

Quando non è obbligatorio l'adeguamento si può procedere con interventi di miglioramento, quando coinvolgono l'intera struttura.

La valutazione della sicurezza e il progetto di intervento devono essere estesi all'intera struttura e alle singoli parti della struttura potenzialmente interessate da modifiche di comportamento

Per le costruzioni di classe III ad uso scolastico e di classe IV, l'indice di sicurezza sismica dovrà essere

$$\zeta_E^m \geq 0.6$$

Per le altre costruzioni di classe III e per quelle di classe II, l'indice di sicurezza sismica dovrà essere incrementato

$$\zeta_E^m \geq \zeta_E^o + 0.1$$

RIPARAZIONE O INTERVENTO LOCALE

Quando gli interventi riguardano singole parti della struttura si può procedere a interventi di tipo locale, purché essi non comportino il cambiamento del comportamento globale della costruzione.

In generale sono interventi mirati a:

- a. Ripristinare le caratteristiche iniziali di parti danneggiate*
- b. Migliorare le caratteristiche di resistenza e/o duttilità di elementi*
- c. Impedire la formazione di meccanismi locali*
- d. Modificare un elemento o una porzione limitata della struttura*

Il progetto e la valutazione della sicurezza possono essere riferiti alle sole parti o elementi interessati, dimostrando che non si producono modifiche sostanziali al comportamento dell'intera struttura e che gli interventi non comportano una riduzione della sicurezza preesistente

CONOSCENZA DELL'OGGETTO

CONOSCENZA DELL'OGGETTO

Per procedere ad un'analisi adeguata dell'edificio oggetto della verifica è indispensabile la sua conoscenza, che può essere ottenuta con diversi livelli di approfondimento.

Innanzitutto è necessario eseguire una ricerca storica per ricostruire la storia dell'edificio dalla costruzione ad oggi considerando le seguenti fonti di informazione

- *documenti di progetto*
- *eventuale documentazione di progettazione o di altro tipo, riguardanti interventi successivi alla costruzione od eventi particolari (bellici, sismici)*

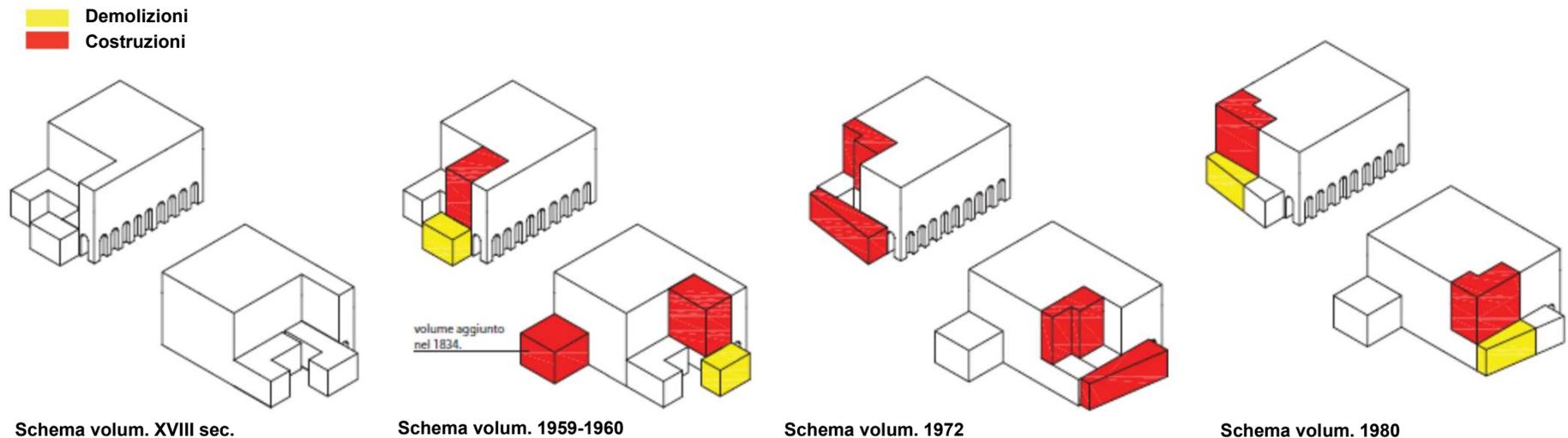
Sono poi necessarie indagini di vario tipo, che costituiranno la base di partenza per le fasi di diagnostica e di progetto.

- *Rilievo geometrico*
- *Rilievo dei dettagli costruttivi*
- *Prove in-situ e in laboratorio riguardanti i materiali*

RICERCA STORICA

E' necessaria una ricerca storica per risalire all'organismo originale e poter disporre di tutte le variazioni successive dovute a ristrutturazioni, parziali ricostruzioni, ampliamenti, ecc.

Tali informazioni consentono anche di ricostruire l'eventuale disomogeneità di materiali impiegati nei vari interventi



INFORMAZIONI DIMENSIONALI

Rilievo geometrico

Rilievo in-situ delle dimensioni effettive delle parti strutturali, dei pesi propri delle stesse, dell'organizzazione dei solai di piano e di copertura, nonché della tipologia delle fondazioni.

E' importante individuare la presenza di cavità, nicchie, canne fumarie all'interno della muratura, in quanto interrompono la continuità.

I risultati del rilievo vanno dettagliatamente rappresentati in forma grafica (*piante, prospetti, sezioni, particolari*).

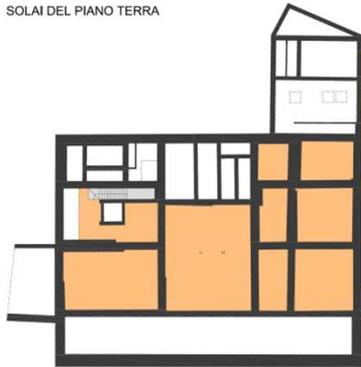
Rilievo dell'eventuale quadro fessurativo, indicando chiaramente la tipologia di fessura (*distacco, rotazione, scorrimento, spost. fuori piano*)

Rilievo dell'eventuale presenza di deformazioni permanenti (*fuori piombo, rigonfiamenti, depressioni delle volte*)

Queste informazioni devono essere adeguate affinché durante la fase di diagnostica sia possibile risalire all'origine dei difetti riscontrati

SOLAI

SOLAI DEL PIANO TERRA



SOLAI DEL PIANO AMMEZZATO



Volte in mattoni



LEGENDA STRUTTURE DI ELEVAZIONE INCLINATE

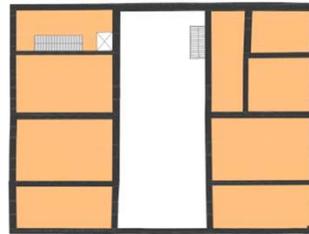
-  Scala in calcestruzzo armato supportate dalle murature di perimetro
-  Scala con struttura di contorno in profilati metallici a doppio T con interposta soletta in calcestruzzo
-  Scala in pietra

SOLAI DEL PIANO NOBILE

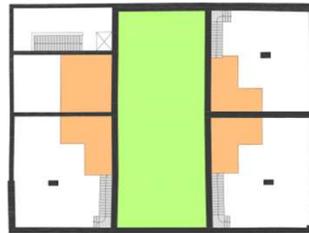


Soletta monolitica

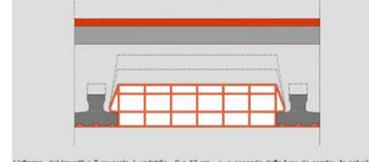
SOLAI DEL PIANO SOFFITTE



SOLAI DEL PIANO SOPPALCHI



Tipologia S01
Solaio con travetti prefabbricati in c.a.p. con interposto laterizio



L'altezza dei travetti a T rovescio è variabile - 9 o 12 cm - e, a seconda della luce da coprire, la soluzione adottata può essere monotrave o bibrave. Si hanno, in genere, solai 20 x 3 cm, 25 x 3 cm e 25 x 4 cm.

Tipologia S02
Solaio Varese



L'altezza delle travi è pari a 3441cm e l'interasse è di 78 cm. Con la soletta di calcestruzzo armato di 3 cm, il solaio raggiunge un'altezza di 44 cm.

Tipologia S03
Solaio di profilati d'acciaio con solaio in latero-cemento

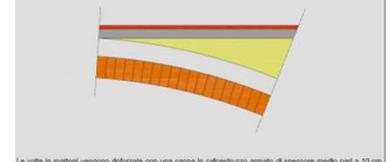


La parte portante del solaio è costituita da due profilati di acciaio saldati HEA 200 A, posti ad un'interasse di 1,20 m; sono collegati trasversalmente da un solaio in precompresso, di altezza pari a 12 x 3 cm.

LEGENDA DEI MATERIALI DEI NUOVI SOLAI

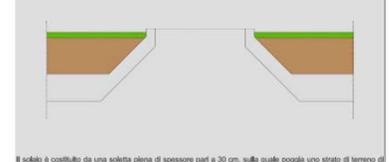
-  Elementi di alleggerimento in laterizio
-  Elementi in legno non portanti
-  Getto in calcestruzzo armato
-  Giardino
-  Mattoni
-  Pavimento
-  Profilati di acciaio
-  Protezione con nylon e carta catramata
-  Riempimento
-  Sottofondo
-  Terreno
-  Travetti in c.a.p.

Tipologia S04
Volte rinforzate con cappa in calcestruzzo armato



Le volte in mattoni vengono rinforzate con una cappa in calcestruzzo armato di spessore medio pari a 10 cm, armata con rete elettrosaldata.

Tipologia S05
Solaio di calcestruzzo armato



Il solaio è costituito da una soletta piena di spessore pari a 30 cm, sulla quale poggia uno strato di terreno di 40 cm circa, per la formazione del giacinto pendente.

INFORMAZIONI SUI DETTAGLI COSTRUTTIVI

Dettagli costruttivi

I dettagli costruttivi da esaminare sono relativi ai seguenti elementi:

- *Qualità del collegamento fra pareti ortogonali*
- *Qualità del collegamento tra pareti e solai ed eventuale presenza di cordoli di piano*
- *Esistenza di architravi strutturalmente efficienti al di sopra delle aperture*
- *Presenza di elementi strutturali spingenti ed eventuali elementi atti ad eliminare la spinta*
- *Presenza di elementi, anche non strutturali, ad elevata vulnerabilità*
- *Tipologia e qualità della muratura (a un paramento, a due paramenti, con o senza collegamenti trasversali), eseguita in pietra o mattoni*

INDAGINI SUI MATERIALI

Materiali

Per risalire alle caratteristiche dei materiali che compongono la struttura è necessario eseguire indagini sperimentali con diversi metodi

- *Rilievo tessitura muraria in superficie ed in sezione (mediante prelievo di carote o mediante prove endoscopiche)*
- *Prelievo di campioni per prove in laboratorio, sui materiali componenti (malta, pietre e/o mattoni) e sulla muratura (pannello soggetto a prova di compressione diagonale o combinata di compressione e taglio)*
- *Prove in-situ con doppio martinetto piatto per resistenza a compressione e modulo elastico longitudinale*

In combinazione si possono utilizzare prove non distruttive quali:

- *Prove soniche*
- *Impulsi radar*
- *Prove termografiche*

SPECIFICHE INDAGINI SUI MATERIALI

Valutazione della qualità muraria (*verifica rispetto regola d'arte*).

L'esame della qualità muraria è fondamentale per stabilire se la muratura in esame è idonea a sopportare le azioni statiche e dinamiche prevedibili per l'edificio in oggetto

E' molto importante verificare la presenza o meno di elementi di collegamento trasversale tra i paramenti (*es. diaconi*), la forma, tipologia e dimensione degli elementi, la regolarità dei giunti, la qualità e la consistenza della malta.

Se esiste una chiara corrispondenza tipologica per materiali, pezzatura dei conci, dettagli costruttivi è possibile, in sostituzione delle prove sperimentali, utilizzare i risultati di prove eseguite su altri edifici della zona.

LIVELLI DI CONOSCENZA

Al fine della scelta del tipo di analisi e dei fattori di confidenza vengono definiti tre livelli di conoscenza

- *LC1 – Conoscenza limitata*
- *LC2 – Conoscenza Adeguata*
- *LC3 – Conoscenza Accurata*

Gli aspetti che definiscono i livelli di conoscenza sono:

- *Geometria (rilievo strutturale, dissesti, fessurazioni, ecc.)*
- *Dettagli costruttivi (organizzazione strutturale)*
- *Proprietà dei materiali (resistenze meccaniche, fisiche)*

Maggiore conoscenza → maggiore confidenza

LIVELLI DI CONOSCENZA

Livello di conosc.	Geometria	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Fatt. di Confid.
LC1	Dai disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e indagini limitate in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e prove limitate in situ.	1.35
LC2	Dai disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Elaborati progettuali incompleti con indagini limitate in situ; in alternativa indagini estese in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con prove limitate in situ; in alternativa da prove estese in situ	1.20
LC3	Dai disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Elaborati progettuali completi con indagini limitate in situ; in alternativa indagini esaustive in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con prove estese in situ; in alternativa da prove esaustive in situ	1.00

PARAMETRI MECCANICI MATERIALI

Per i diversi livelli di conoscenza si assumono i parametri meccanici

Livello di conoscenza	Resistenze	Moduli elastici
LC1	Valori minimi degli intervalli riportati nella Tab. C8.5.1 per la tipologia muraria in considerazione	Valori minimi degli intervalli riportati nella Tab. C8.5.1 per la tipologia muraria in considerazione
LC2	Valori medi degli intervalli riportati nella Tab. C8.5.1 per la tipologia muraria in considerazione	Valori medi degli intervalli riportati nella Tab. C8.5.1 per la tipologia muraria in considerazione
LC3	<p>Se sono disponibili 3 valori speriment. media dei risultati delle prove</p> <p>Se si dispone di un valore speriment. Se compreso nell'intervallo di Tab. C8.5.1 o superiore: valore medio; se minore: valore sperimentale.</p>	Il minore fra la media dei valori degli intervalli riportati nella Tab. C8.5.1 per la tipologia muraria in considerazione e la media dei valori sperimentali

I valori di calcolo da utilizzare per calcolare la capacità degli elementi si ottengono dividendo questi valori per il Fatt. di Confidenza e per il coefficiente di sicurezza parziale γ_m come per edifici nuovi

PARAMETRI MECCANICI MATERIALI

Tabella C8.5.1 -Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura, da usarsi nei criteri di resistenza di seguito specificati (comportamento a tempi brevi), e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura. I valori si riferiscono a: f = resistenza media a compressione, τ_0 = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), f_{v0} = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio.

Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	- -	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	- -	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	- -	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,4-2,2	0,028-0,042	- -	900-1260	300-420	13 ÷ 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadriati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

(*) Nella muratura a conci sbozzati i valori di resistenza tabellati si possono incrementare se si riscontra la sistematica presenza di zeppe profonde in pietra che migliorano i contatti e aumentano l'ammorsamento tra gli elementi lapidei; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente pari a 1,2.

(**) Data la varietà litologica della pietra tenera, il peso specifico è molto variabile ma può essere facilmente stimato con prove dirette. Nel caso di muratura a conci regolari di pietra tenera, in presenza di una caratterizzazione diretta della resistenza a compressione degli elementi costituenti, la resistenza a compressione f_{pu} può essere valutata attraverso le indicazioni del § 11.10 delle NTC.

(***) Nella muratura a mattoni pieni è opportuno ridurre i valori tabellati nel caso di giunti con spessore superiore a 13 mm; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente riduttivo pari a 0.7 per le resistenze e 0.8 per i moduli elastici.

COEFFICIENTI CORRETTIVI MATERIALI

Tabella C8.5.II -Coefficienti correttivi massimi da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone; ricorsi o listature; sistematiche connessioni trasversali; consolidamento con iniezioni di malta; consolidamento con intonaco armato; ristilatura armata con connessione dei paramenti.

Tipologia di muratura	Stato di fatto			Interventi di consolidamento			
	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Iniezione di miscele leganti (*)	Intonacoarmato (**)	Ristilatura armata con connessione dei paramenti (**)	Massimo coefficiente complessivo
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	1,3	1,5	2	2,5	1,6	3,5
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo	1,4	1,2	1,5	1,7	2,0	1,5	3,0
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	1,1	1,3	1,5	1,5	1,4	2,4
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,5	1,2	1,3	1,4	1,7	1,1	2,0
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,6	-	1,2	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura a blocchi lapidei squadri	1,2	-	1,2	1,2	1,2	-	1,4
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	(***)	-	1,3 (****)	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	1,2	-	-	-	1,3	-	1,3

(*) I coefficienti correttivi relativi alle iniezioni di miscele leganti devono essere commisurati all'effettivo beneficio apportato alla muratura, riscontrabile con verifiche sia nella fase di esecuzione (iniettabilità) sia a-posteriori (riscontri sperimentali attraverso prove soniche o similari).

(**) Valori da ridurre convenientemente nel caso di pareti di notevole spessore (p.es. > 70 cm).

(***) Nel caso di muratura di mattoni si intende come "malta buona" una malta con resistenza media a compressione f_m superiore a 2 N/mm². In tal caso il coefficiente correttivo può essere posto pari a $f_m^{0,35}$ (f_m in N/mm²).

(****) Nel caso di muratura di mattoni si intende come muratura trasversalmente connessa quella apparecchiata a regola d'arte.

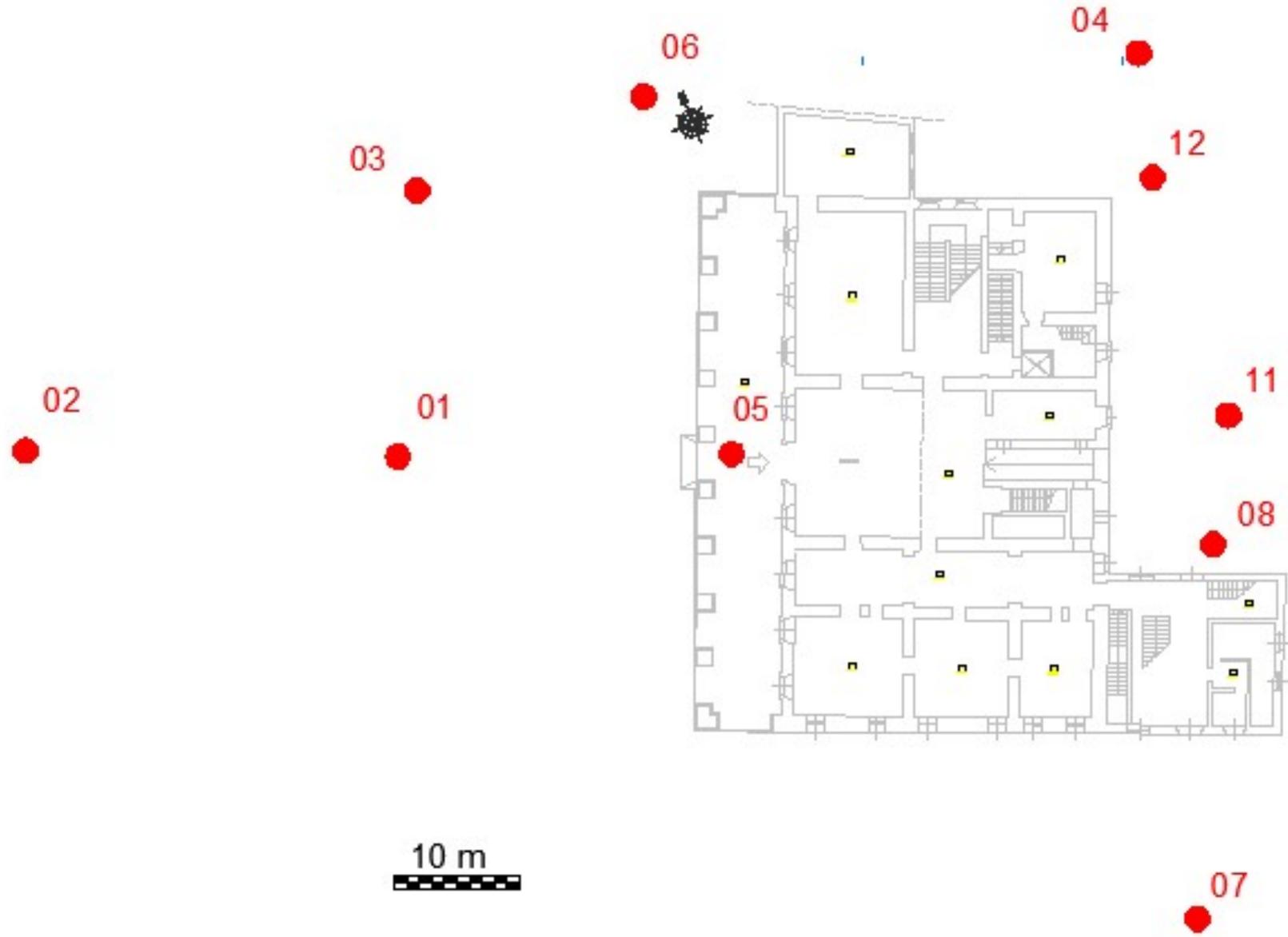
TECNICHE DI INDAGINE

Per il rilievo della geometria della struttura, oltre alle misure dirette, possono essere usate varie tecniche di misurazione indiretta mediante l'utilizzo di tecniche fotogrammetriche, strumenti topografici, strumenti manuali a diodo luminoso, strumenti per la misura delle inclinazioni delle pareti (*clinometri*).

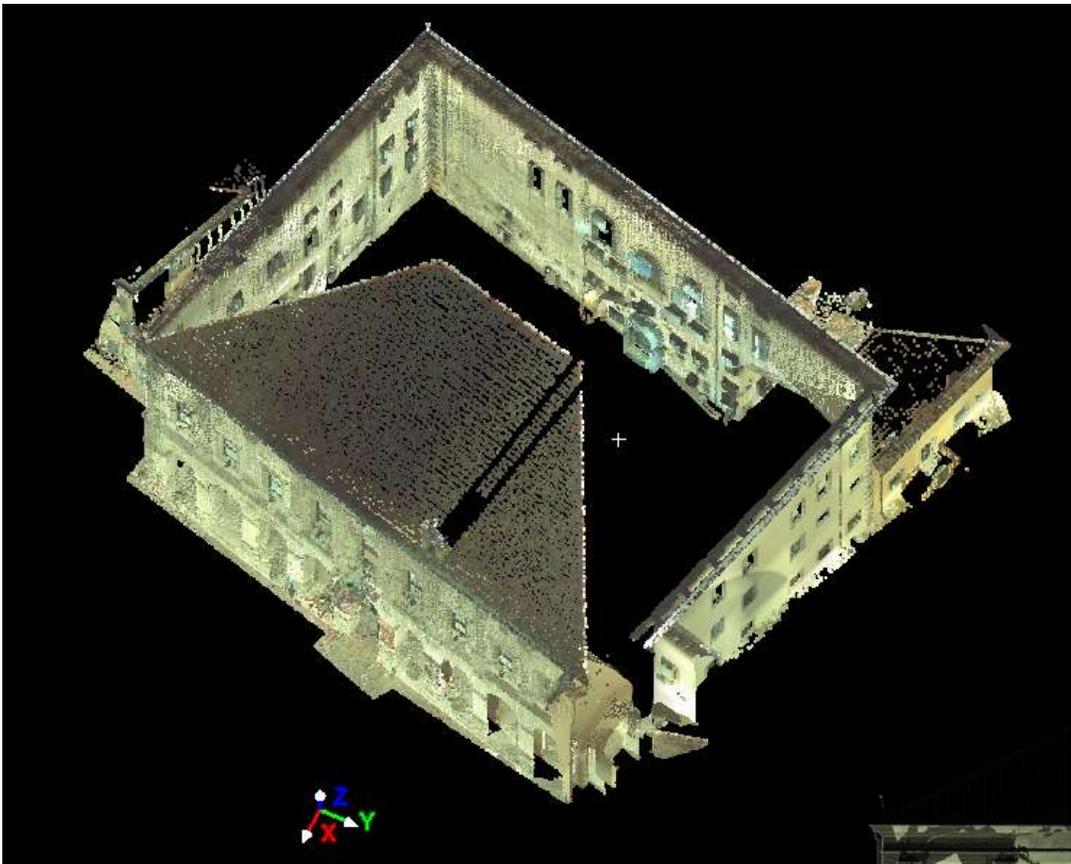
- *Le tecniche fotogrammetriche consentono di rilevare in dettaglio le superfici esterne di edifici complessi e di grandi dimensioni con precisioni molto elevate*
- *Per la collocazione spaziale di queste superfici si possono utilizzare strumenti topografici per l'individuazione delle coordinate 3D di un certo numero di punti delle superfici mirando su bersagli o direttamente su punti della superficie se si usano strumenti reflectorless.*
- *Per le misure interne si possono utilizzare strumenti manuali, basati sul tempo di ritorno di un segnale luminoso che colpisce un ostacolo*

Strumenti topografici a scansione laser (*rilievo tridimensionale*)

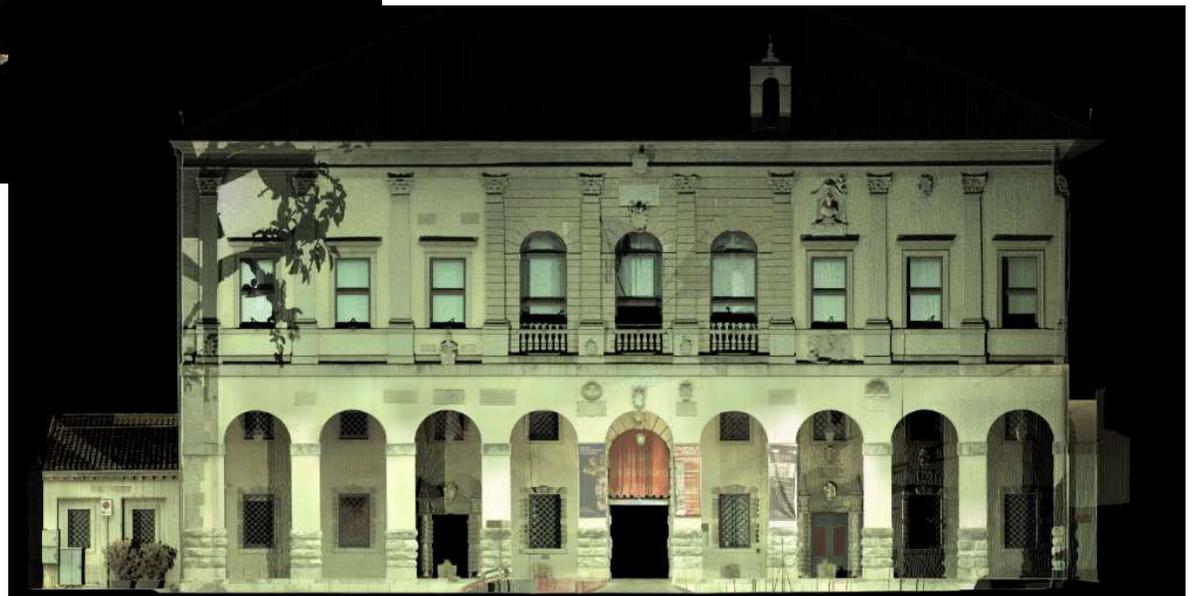
RILIEVO LASER SCANNER



RILIEVO LASER SCANNER



Ortofoto del prospetto principale
derivante dalla vista in proiezione
ortografica della nuvola di punti
colorata



Ricostruzione 3D dell'oggetto
colorando la nuvola di punti
rilevati con i colori reali ricavati
dalle immagini acquisite
contestualmente al rilievo laser
dalla fotocamera integrata nello
stesso strumento

TECNICHE DI INDAGINE

Per il rilievo della tessitura muraria in superficie è necessario rimuovere l'intonaco in modo da mettere a nudo le murature. L'indagine è di tipo visivo e consente di individuare come è fatta la muratura: **pietre/mattoni** (*tipo di materiale, dimensioni e forma, organizzazione regolare o irregolare*), **malta** (*tipo di malta, dimensione dei giunti*).

Per il rilievo della stratigrafia della muratura è necessario ricorrere al prelievo di carote e/o a indagini endoscopiche. Entrambe le tecniche non consentono però di riconoscere la tessitura nello spessore, che può essere visualizzata solo attraverso limitati scassi.

Per la caratterizzazione dei materiali si eseguono dei prelievi di campioni che saranno sottoposti a prove di laboratorio chimiche, petrografiche, fisiche e meccaniche.

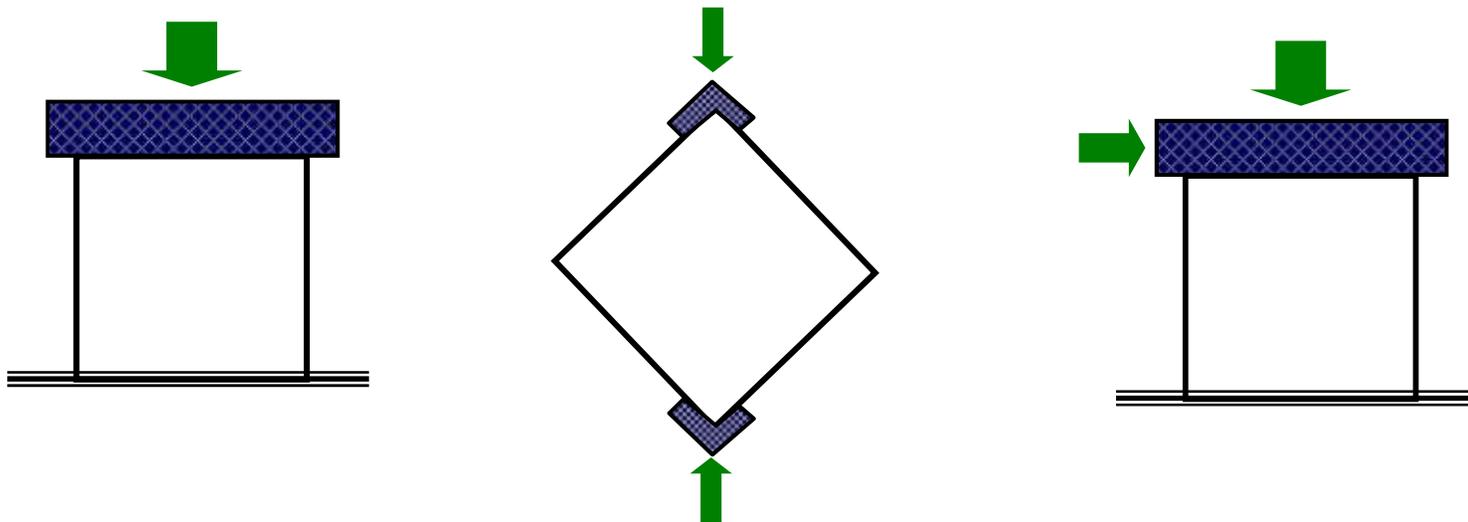


PROVE SULLA MURATURA

Prove meccaniche di laboratorio

Si prelevano dei campioni di muratura di opportune dimensioni e si sottopongono a prove specifiche mirate alla determinazione della resistenza a compressione, taglio, trazione, pressoflessione e i valori del modulo elastico longitudinale e tagliante.

Si eseguono prove di compressione verticale, di compressione diagonale e combinate di compressione e taglio.



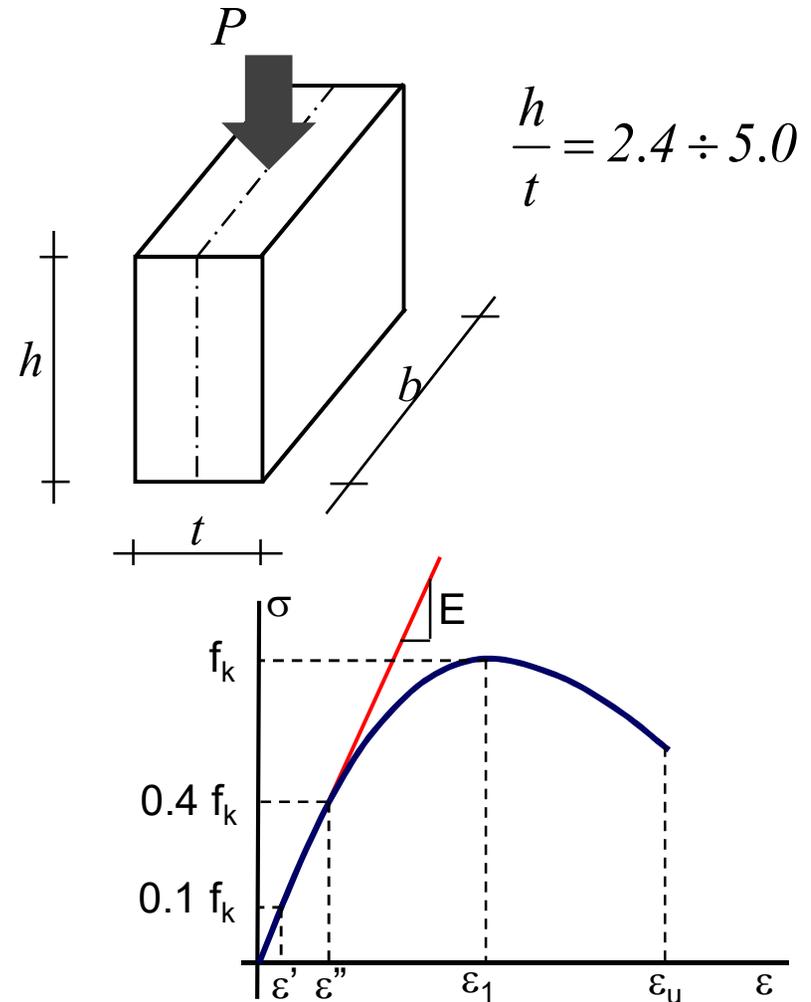
CARATTERISTICHE MECCANICHE MURATURA

Prova di compressione

La resistenza a compressione si ricava sperimentalmente mediante prove di compressione su muretti di altezza compresa tra 2.4 e 5.0 volte lo spessore.

$$f_k = \frac{P}{b t}$$

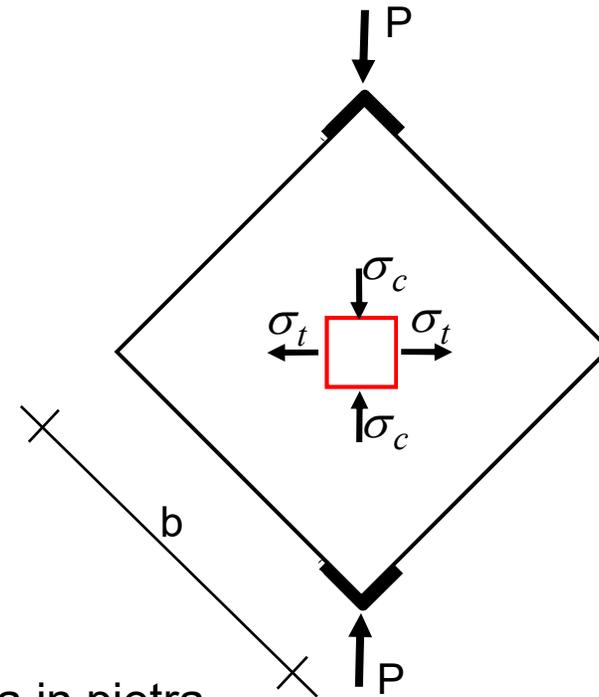
$$E = \frac{(0.4 - 0.1)}{(\varepsilon'' - \varepsilon')} f_k$$



CARATTERISTICHE MECCANICHE MURATURA

Prova di compressione diagonale

La resistenza a taglio si ricava sperimentalmente mediante prove di compressione diagonale su muretti delle dimensioni di circa 1.2x1.2 m



$$f_t = \alpha \cdot \frac{P}{b t}$$

$\alpha = 0.35$ per muratura in pietra
 $\alpha = 0.50$ per muratura di mattoni pieni
(Brignola, Frumento, Lagomarsino, Podestà - 2009)

Circolare 21.01.2019 n. 7/Cons. Sup. LL. PP. – C8.7.1.3.1.1



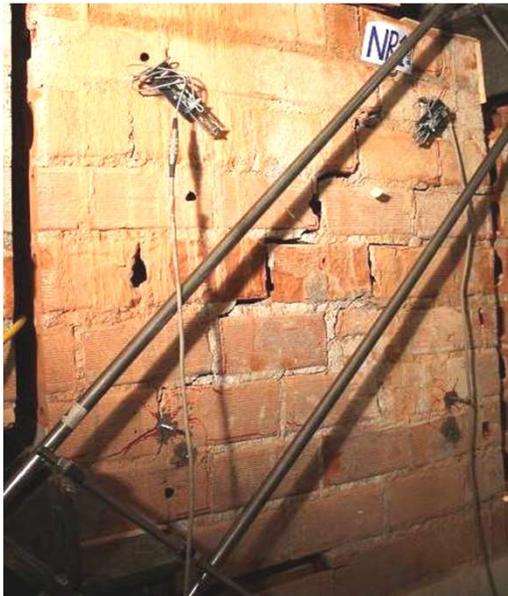
$$\tau_o = \frac{f_t}{1.5}$$

CARATTERISTICHE MECCANICHE MURATURA

Prova di compressione diagonale

Alcuni esempi di campioni preparati per essere sottoposti a prova di compressione diagonale.

Un pannello di muratura è sottoposto alla prova sperimentale

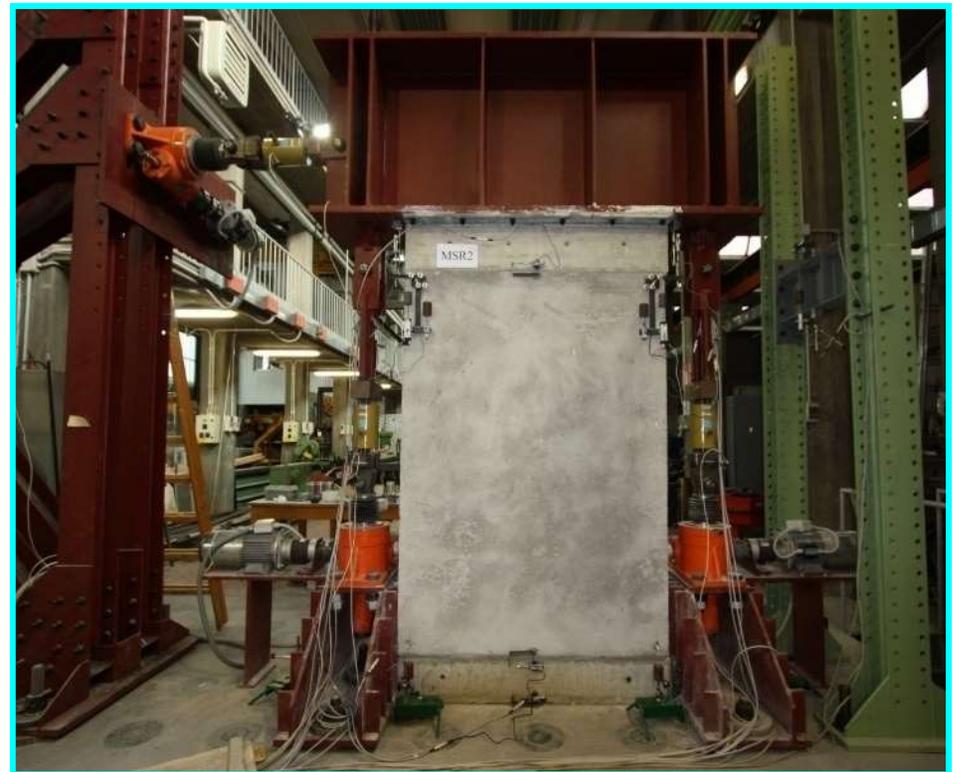
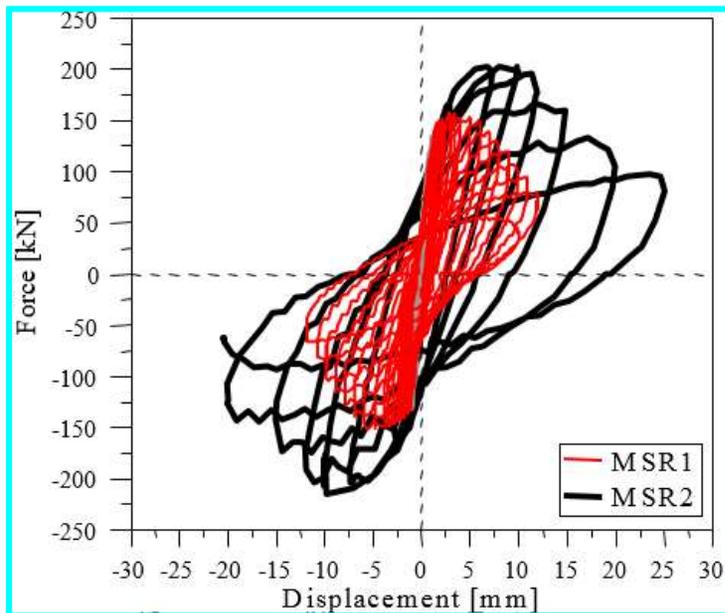


CARATTERISTICHE MECCANICHE MURATURA

Prova di taglio-compressione

Simula lo stato di sollecitazione di un maschio murario soggetto a compressione e taglio.

Esempio di prova eseguita presso il laboratorio prove materiali e strutture del DIA



PROVE SULLA MURATURA IN-SITU

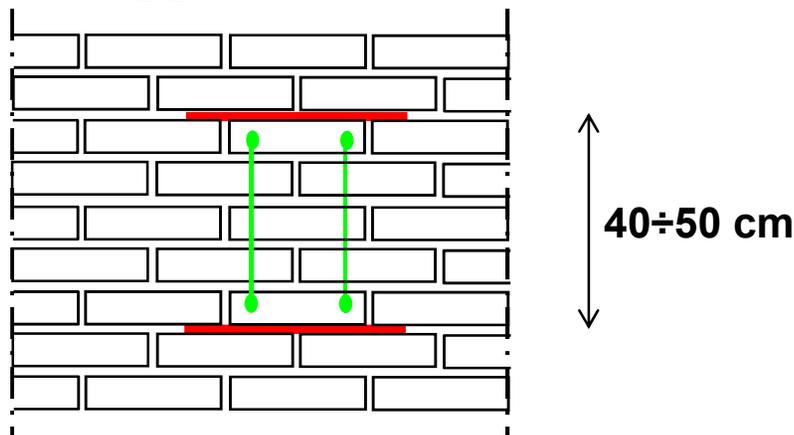
Prove con doppio martinetto piatto

Questa prova consente di rilevare sia lo stato tensionale presente nella muratura sia la resistenza a compressione ed il modulo elastico

Si eseguono due sedi orizzontali parallele nella muratura, aventi le dimensioni dei martinetti piatti che sono utilizzati nella prova, ad una distanza di 40÷50 cm.

Si inseriscono i martinetti e si applicano, alla muratura compresa tra i martinetti, due o tre trasduttori di spostamento.

Si inizia ad incrementare la pressione nei martinetti e contemporaneamente si leggono i valori di spostamento corrispondenti



Per rilevare lo stato tensionale presente nella muratura si deve eseguire una lettura dei trasduttori prima di eseguire le sedi per alloggiare i martinetti.

PROVE SULLA MURATURA IN-SITU

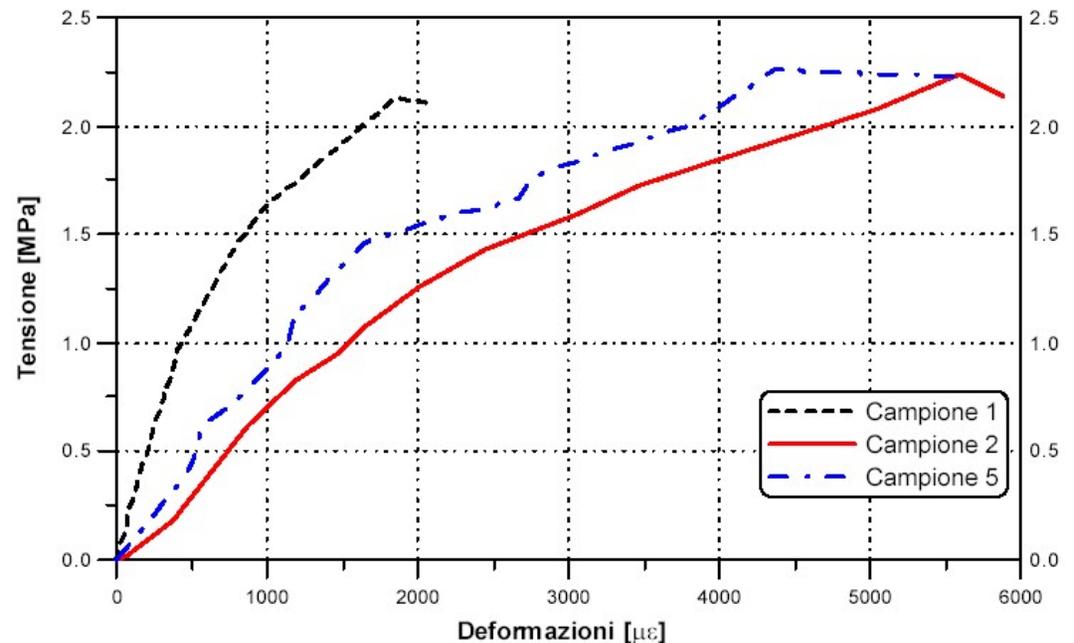
Prove con doppio martinetto piatto

Chiamando con p la pressione idraulica nel martinetto, l'effettiva tensione presente nella muratura compresa tra i due martinetti è pari a

$$\sigma = k_f k_a p$$

k_f è una costante di calibrazione del martinetto (< 1.0)

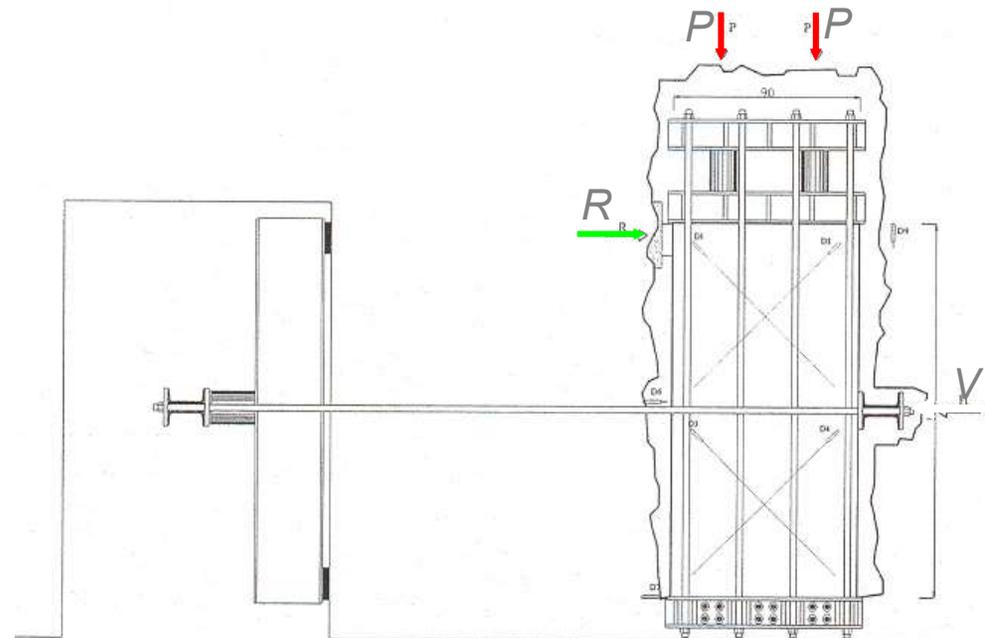
k_a è una costante che tiene conto della forma della sede e del martinetto



PROVE SULLA MURATURA IN-SITU

Prove di compressione diagonale e taglio-compressione

Le prove sono più invasive rispetto al prelievo di campioni da provare in laboratorio, ma hanno il vantaggio di un minore disturbo del campione (*rimozione, movimentazione, trasporto*)



Borri, Corradi, Vignoli (2000)

PROVE NON DISTRUTTIVE

Indagini soniche

Consentono di caratterizzare e descrivere qualitativamente la muratura. Si basa sulla generazione di impulsi sonici attraverso la percussione con martello strumentato (*produce vibrazioni nell'impatto*) e ricezione del segnale con accelerometro disposto ad una certa distanza da dove è stato applicato l'impulso

Si rileva il tempo che il segnale ha impiegato per compiere la distanza fra emissione e ricezione, e da questo si ricava la velocità di propagazione delle onde elastiche

Per materiali elastici, omogenei e isotropi esiste una relazione che lega questa velocità al modulo elastico E ed alla densità ρ

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

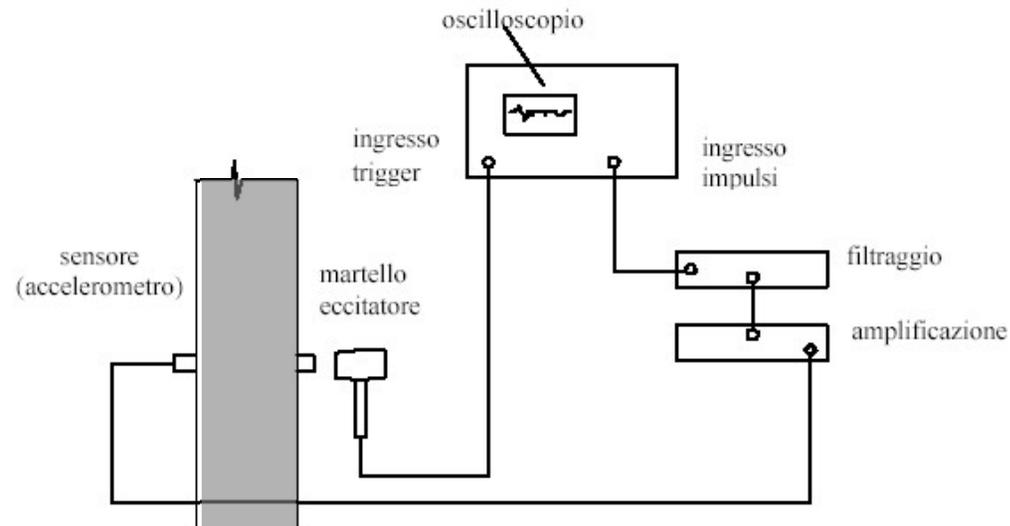
La velocità è maggiore nei solidi omogenei e minima nell'aria.

PROVE NON DISTRUTTIVE

Indagini soniche

In presenza di lesioni, fratture o discontinuità la velocità sonora diminuisce. Nelle discontinuità infatti l'onda è più lenta.

La frequenza del segnale di input nella prova è circa pari a 3.5 kHz.



Oscilloscopio analizza e registra le forme d'onda generate dal martello e rilevate dall'accelerometro situato sul lato opposto della muratura.

Strumento adatto per il controllo dell'omogeneità del materiale