



kerakoll

**IL CONSOLIDAMENTO E IL RINFORZO DI STRUTTURE ESISTENTI CON
SISTEMI CERTIFICATI**

Giovedì 22 Maggio 2025

Villa Crowford Via Nuova Rione Cappuccini 2 –S. Agnello (NA)

**Patologie, diagnosi e tecniche innovative di retrofit
sismico di edifici in muratura**

Prof. Ing. Antonio Formisano



Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura (DIST)

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base

Università degli Studi di Napoli "Federico II"



Indice

- 1 Introduzione
- 2 Fenomeni di degrado degli edifici in muratura
- 3 Conoscenza dell'esistente e tecniche diagnostiche
- 4 Retrofit sismico con soluzioni innovative sostenibili
- 5 Esempio applicativo



Intonaci sismo-resistenti con fibre di canapa



FRCM con rete in fibre di canapa

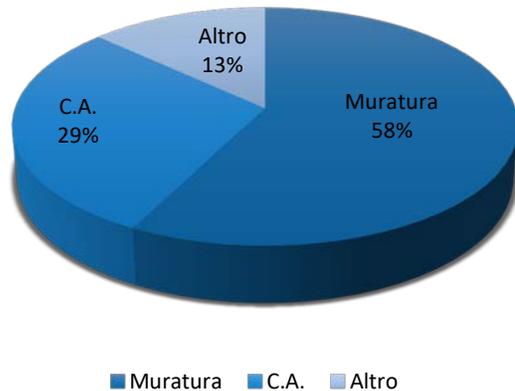
Le tipologie strutturali

Secondo il 15° Censimento ISTAT della popolazione e delle abitazioni (2011), le tipologie costruttive che caratterizzano il patrimonio edilizio esistente sono 3:

- **Muratura portante;**
- **Calcestruzzo armato;**
- **Altri materiali (Acciaio, legno).**

Fonte: ISTAT, 2011

Tipologie Edilizie

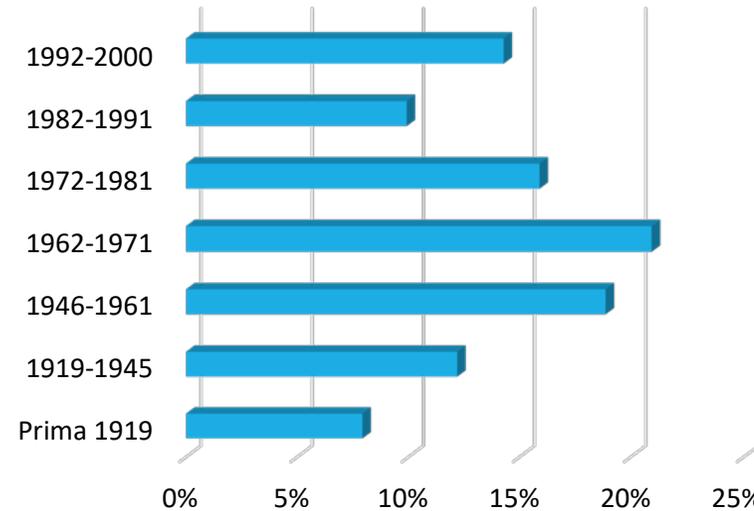


L'età del patrimonio edilizio esistente

Gran parte degli edifici esistenti sia in muratura che in c.a. è stata realizzata prima degli anni '80 del XX secolo senza alcun criterio di progettazione antisismico.

Fonte: ISTAT, 2011

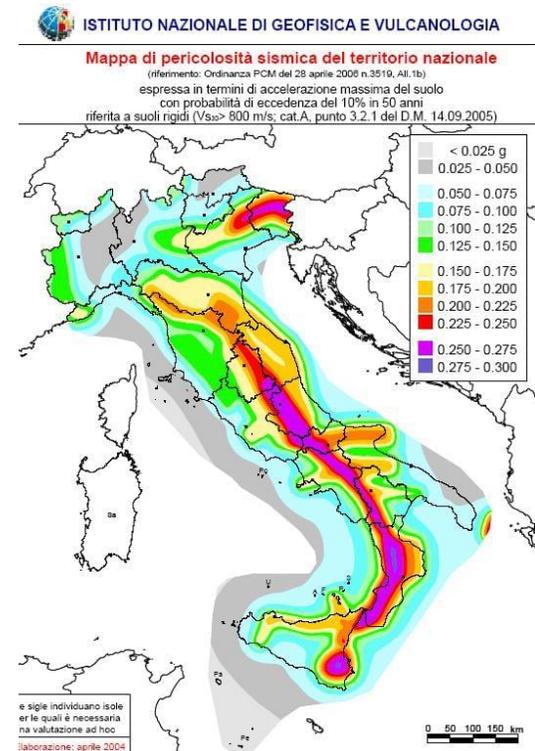
Epoca di costruzione



Per questo motivo, questi edifici non sono in grado di sopportare azioni sismiche ed oggi si trovano in condizioni di avanzato degrado.



Inoltre, una larga percentuale degli edifici esistenti si trova nelle zone a sismicità più elevata (Abruzzo, Marche e, in generale, lungo l'intera dorsale appenninica).



Problemi di natura energetica

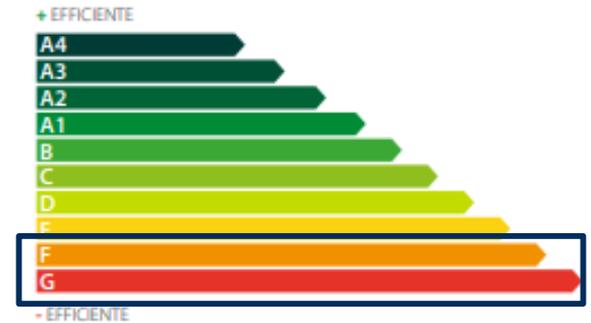
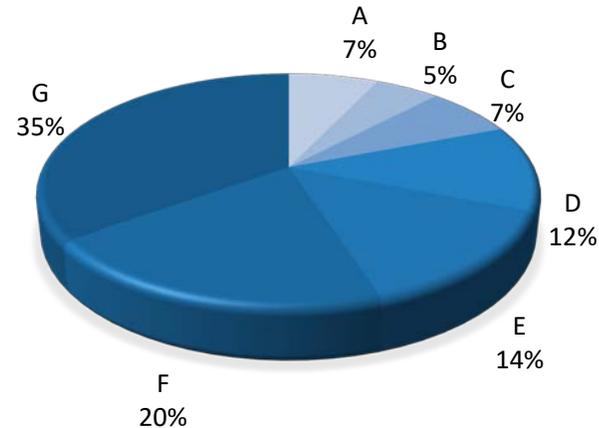
Oltre agli inevitabili danni dovuti all'assenza di una progettazione antisismica, tali strutture presentano anche problemi di **natura energetica**, presentando notevoli fenomeni di **dispersioni termiche**.



- Strutture verticali: 25%
- Infissi: 15%
- Copertura: 20%
- Solaio di primo calpestio: 7%

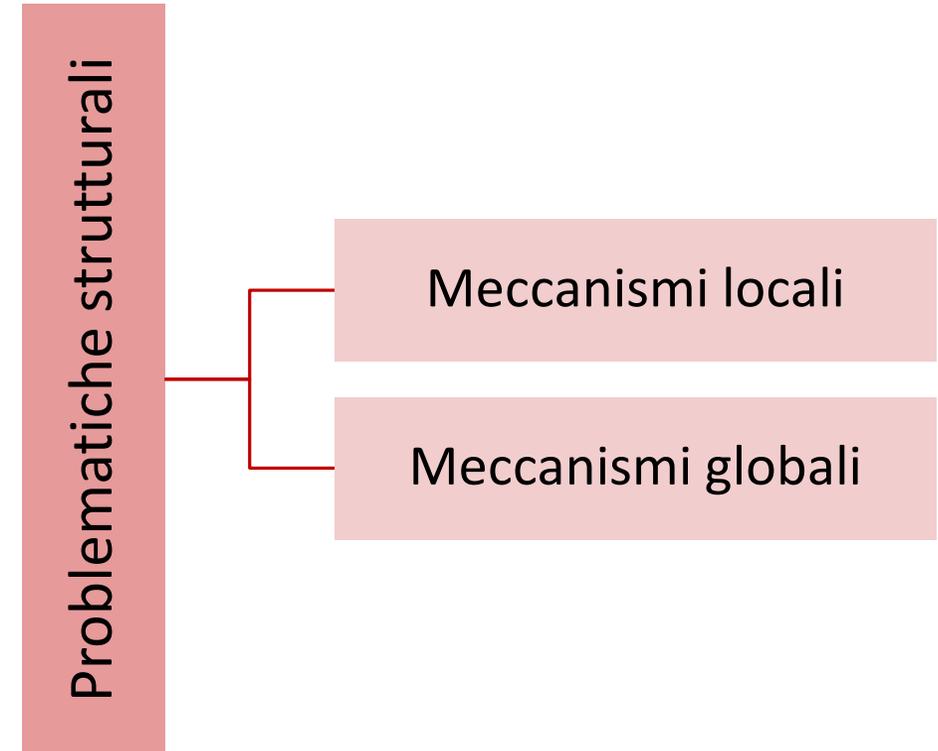
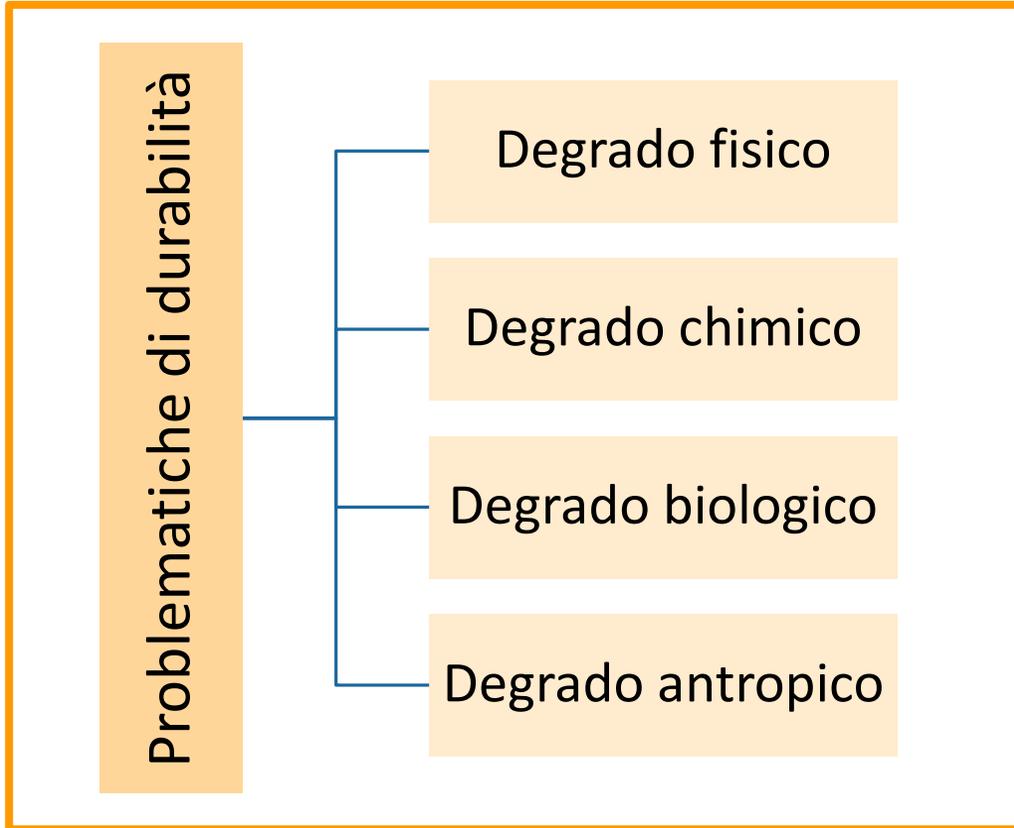
Oltre il 50% del patrimonio edilizio esistente, per via di tali dispersioni, rientra nelle **due classi energetiche più basse** (F e G).

Efficienza energetica del patrimonio edilizio italiano
ENEA



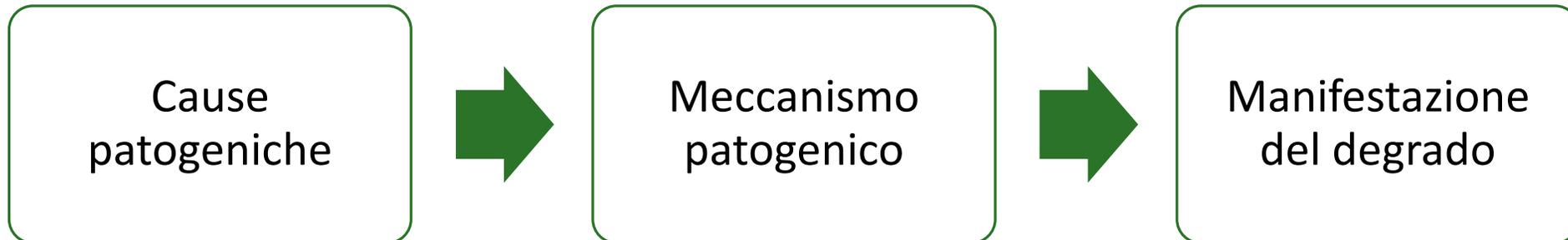
È dunque necessario applicare una **strategia di intervento integrata** in grado di coniugare sia gli aspetti sismici, spesso trascurati, che quelli energetici al fine di **migliorare le performance strutturali** e di **ridurre le dispersioni termiche** delle costruzioni esistenti.

Problematiche di durabilità e strutturali per edifici esistenti in muratura



Che cosa si intende per degrado?

Le manifestazioni di degrado sono attivate da una o più cause iniziali che, attraverso un meccanismo patogenico legato a uno o più fattori fisici, generano uno o più fenomeni degradativi che si manifestano con segni visibili.



Per ridurre o eliminare qualsiasi fenomeno di degrado è necessario agire prima sulla causa e poi sull'effetto.

Come identificare i fenomeni di degrado?

- Rilievo del manufatto.
- Indagini in situ e di laboratorio.

Cause dei fenomeni di degrado

- **Intrinseche:** dovute al sito, a difetti di progettazione, ai materiali, alle tecnologie costruttive, ecc.
- **Estrinseche:** umidità, fattori metereologici o climatici, inquinamento, aggressione biologica, ecc.

Le famiglie di degrado

- **Perdita per sottrazione di materiale:** erosione, esfoliazione, scagliatura, ecc.
- **Aggiunta di materiale estraneo:** patina biologica, deposito superficiale, ecc.
- **Alterazione della forma:** deformazione, rigonfiamento, ecc.

Processi di degrado

- **Degrado fisico**
- **Degrado chimico**
- **Degrado biologico**
- **Degrado antropico**

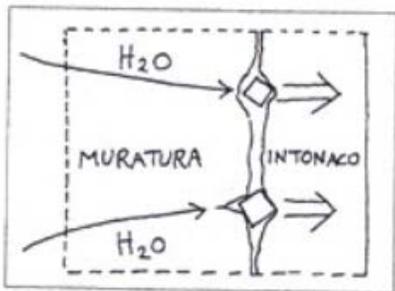
Degrado fisico

Che cosa si intende per degrado fisico?

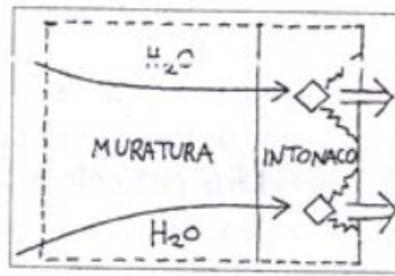
Processo che si produce per fenomeni di tipo fisico, che causano la disgregazione del materiale lapideo.

Le cause

- **Azioni meccaniche:** usura, abrasioni, tensioni interne;
- **Azione dei sali:** aumento di volume e pressioni elevate;
- **Ciclo di gelo e disgelo:** aumento del volume specifico e delle tensioni di trazione;
- **Dilatazioni termiche:** variazioni volumetriche.



Distacco



Disgregazione

Gli effetti

- **Fratturazioni/Fessurazioni**
- **Decoesione**
- **Esfoliazione**
- **Distacco**
- **Erosione**
- **Polverizzazione delle malte**



Degrado chimico

Che cosa si intende per degrado chimico?

Processo che comporta una modificazione della composizione chimico – mineralogica del materiale lapideo. È dovuto ad una reazione tra il materiale, gli agenti atmosferici e gli agenti inquinanti.

Le cause

- Azioni climatiche
- Acqua
- Temperatura



Gli effetti

- Polverizzazione
- Disgregazione
- Variazione cromatica
- Croste nere
- Corrosione

Degrado biologico

Che cosa si intende per degrado biologico?

Si tratta di un processo che, seppur causato da fattori chimici o fisici, è innescato da organismi viventi a contatto con materiali inorganici (intonaci, pittura, ecc.) o organici (legno, carta, ecc.)

Le cause

- Batteri e funghi
- Alghe
- Licheni
- Vegetazione infestante
- Escrementi di uccelli



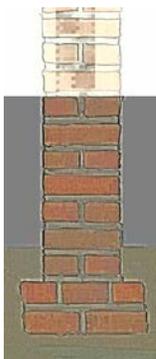
Gli effetti

- Patina biologica
- Vegetazione infestante
- Patine



Fenomeni di umidità (degrado fisico, chimico e biologico)

Umidità da risalita capillare



- L'acqua nel terreno, derivante da falde sotterranee, perdite nelle tubazioni o infiltrazioni superficiali, penetra nei corpi murari, li impregna e risale vincendo la gravità.

- Trasporta sali che cristallizzano, aumentando il volume dell'intonaco e causandone il distacco.
- L'acqua evapora, lasciando residui di sali sulla superficie.
- Principali manifestazioni: a) Macchie scure fino a 1-1,5 m di altezza; 2) Efflorescenze saline; 3) Patine biologiche.

Umidità meteorica da infiltrazione



- Causata dalle piogge non correttamente raccolte.
- Penetra nella muratura attraverso la porosità del materiale.

- Provoca usura e deterioramento degli elementi di finitura.
- Le parti più colpite sono quelle sommitali.
- Si manifesta con:
 - a) Macchie scure.
 - b) Rigonfiamenti dell'intonaco.
 - c) Formazione di croste nere.

Umidità da condensa



- Avviene quando la temperatura delle pareti è inferiore alla temperatura di rugiada dell'aria interna.

- Il vapore acqueo si condensa, trasformandosi in acqua.
- È più evidente in ambienti con scarsa ventilazione e poco soleggiamento.
- Si manifesta con: a) Macchie e zone scure. b) Rigonfiamenti dell'intonaco. c) Depositi superficiali. d) Muffe e funghi. e) Croste nere e patine biologiche.

Degrado antropico

Che cosa si intende per degrado antropico?

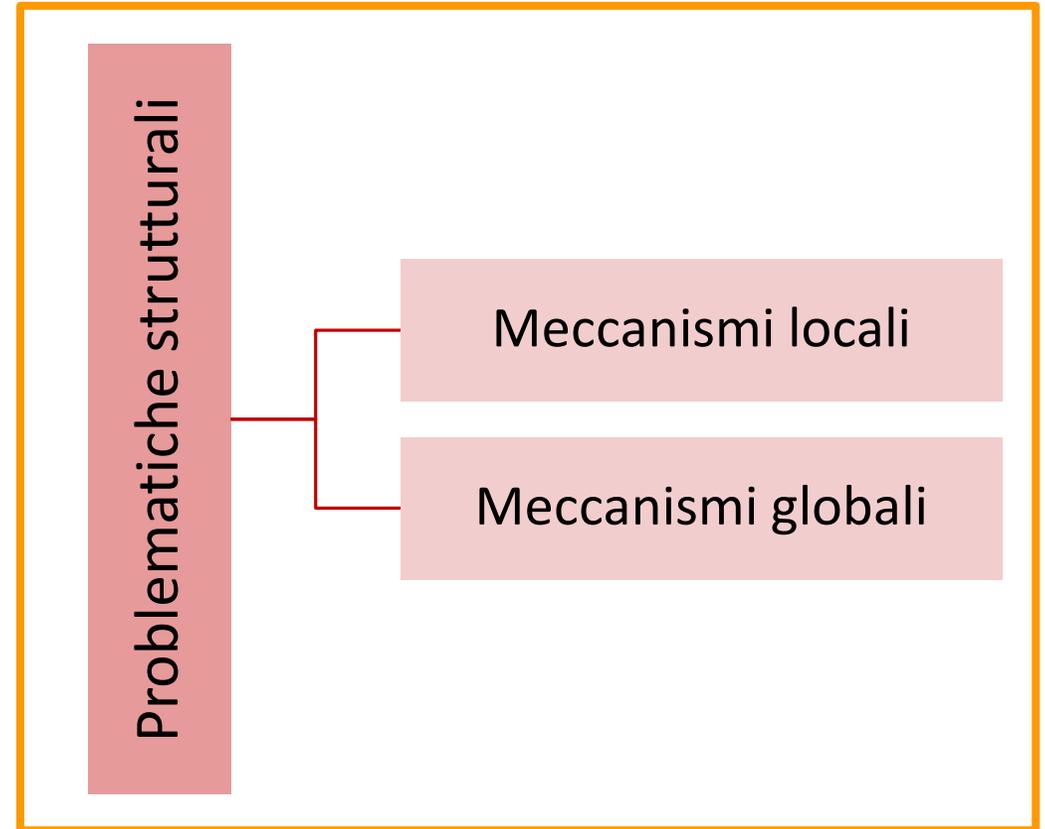
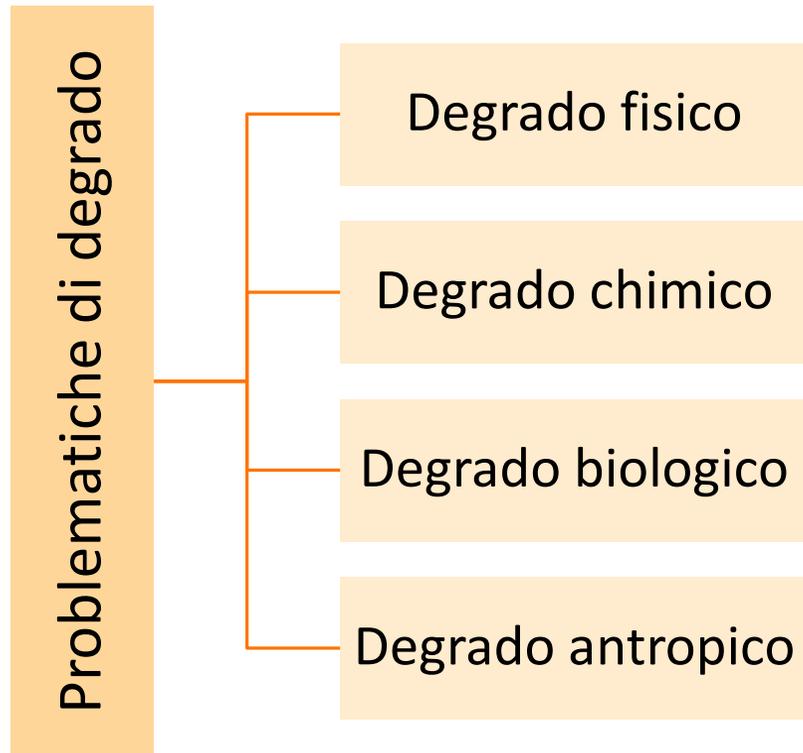
Si intende qualsiasi forma di alterazione o modificazione dello stato di conservazione di un manufatto o del contesto in cui esso è inserito quando questa alterazione è indotta da azioni improprie.

Le cause

- Atti di vandalismo
- Uso improprio del materiale
- Assenza di manutenzione

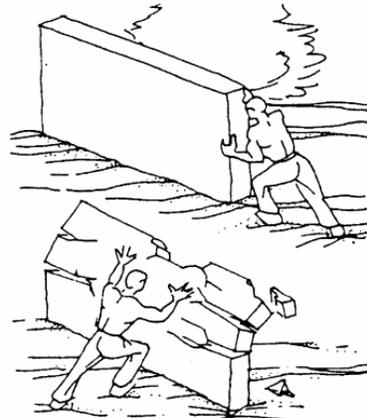
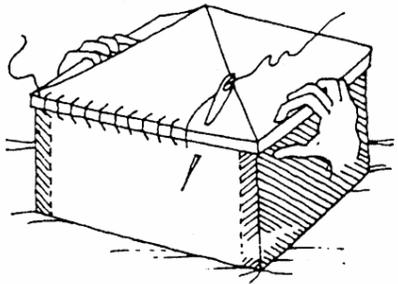


Problematiche di degrado e strutturali per edifici esistenti in muratura



Il comportamento di una struttura in muratura

Affinché una struttura in muratura possa resistere all'azione sismica, è necessario che sia stata concepita con un **COMPORAMENTO SCATOLARE**, in modo da sollecitare le pareti nel proprio piano e da conferire opportuna stabilità e robustezza all'insieme. Un edificio in muratura è quindi una struttura complessa in cui tutti gli elementi cooperano nel resistere ai carichi applicati.

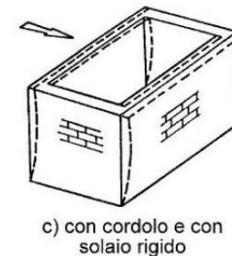
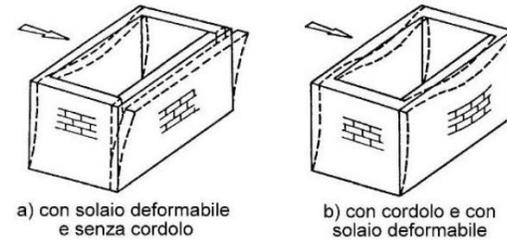
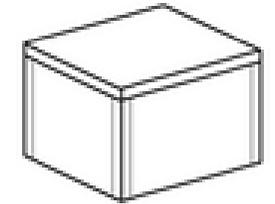
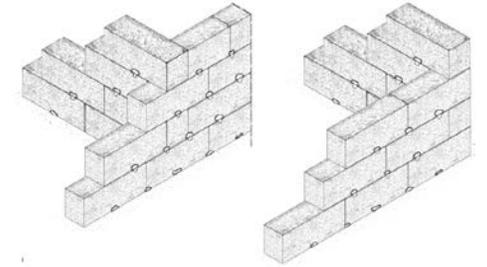


La resistenza delle pareti a forze agenti nel loro piano è molto maggiore rispetto alla resistenza alle forze ad essi ortogonali.

Come si ottiene il comportamento scatolare

1. Ammorsamenti

Devono essere realizzati ammorsamenti non solo tra le pareti verticali adiacenti, ma anche tra paramenti murari e orizzontamenti, realizzando opportuni cordoli di piano. In questo modo, si trasmettono i carichi verticali dai solai alle murature portanti.



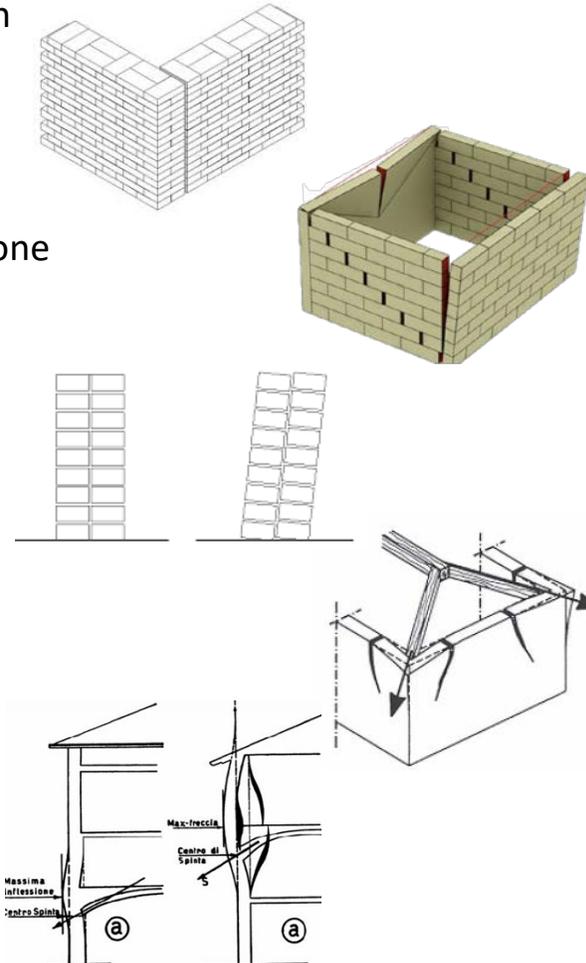
2. Solai di opportuna rigidezza

Il solaio infatti serve, in quanto diaframma orizzontale, a ripartire le forze sismiche sui vari pannelli murari.

La vulnerabilità degli edifici esistenti

Un'elevata vulnerabilità degli edifici in muratura esistenti può derivare da:

- Scarsa qualità muraria;
- Limitata attenzione alla realizzazione di dettagli costruttivi;
- Assenza di ammorsamenti;
- Pochi incatenamenti;
- Appoggi travi inefficaci;
- Carichi elevati;
- Spinte di volte ed archi non contrastate;
- Coperture spingenti.



Assenza di comportamento scatolare



L'edificio non è in grado di comportarsi come un unico insieme di sistemi strutturali orizzontali e verticali, collegati tra loro, capaci di sopportare le sollecitazioni provenienti da eventi di vario tipo.

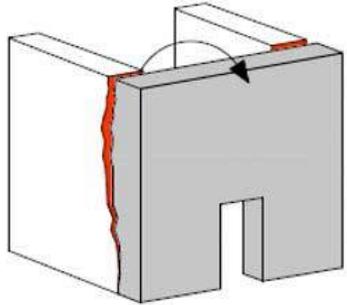
Vulnerabilità

Meccanismi di collasso locale

Meccanismi di collasso globale



Meccanismi locali



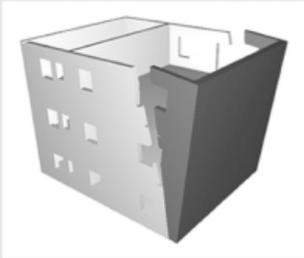
Meccanismi fuori piano - I modo

I **meccanismi di primo modo o meccanismi locali** corrispondono a cinematismi fuori piano di singole pareti o di porzioni di struttura. Si tratta di **fenomeni di ribaltamento e flessione** che portano a collasso la struttura per perdita di equilibrio. Il quadro fessurativo può fornirci un'indicazione di quali meccanismi si possano attivare sulla struttura.

Ribaltamento semplice di parete



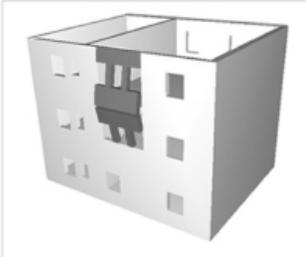
Ribaltamento composto di parete



Flessione orizzontale di parete



Flessione verticale



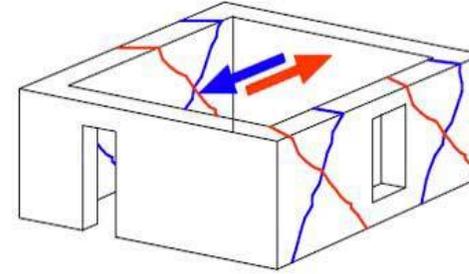
Ribaltamento del cantonale



Sfondamento del timpano



Meccanismi globali

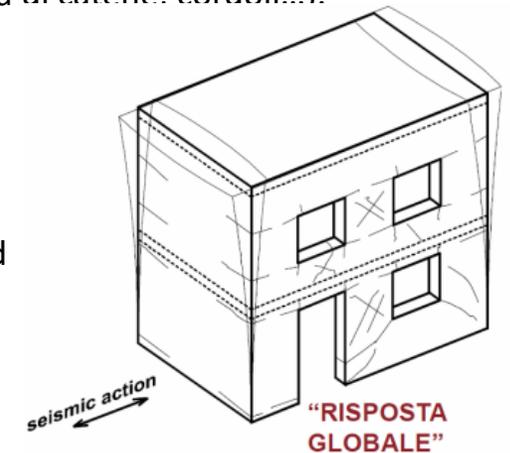


Meccanismi nel piano - II modo

I **meccanismi di II modo** riguardano la risposta della parete nel proprio piano, con tipici danneggiamenti per taglio e pressoflessione. La rottura avviene per superamento della resistenza ultima del materiale. Tali cinematismi si attivano in strutture in grado di sviluppare una risposta globale alla sollecitazione sismica ovvero quando sono impediti (o comunque resi poco probabili) i meccanismi di collasso locali fuori dal piano (presenza di catene, cordoli...).

Il **buon ammortamento** delle pareti e l'efficace vincolo tra pareti e orizzontamenti scongiurano fenomeni di ribaltamento e flessione fuori del piano.

Le pareti, collaborando tra loro, riescono ad attivare una risposta nel loro piano che meglio sfrutta le capacità di rigidità e resistenza della muratura e garantiscono maggiore sicurezza.



Riferimento Normativo: **NTC2018 – Capitolo 8 «Costruzioni esistenti»**

Come si interviene su un edificio esistente?

Nel Cap.8 delle NTC si stabilisce che: «**La valutazione della sicurezza di una struttura esistente è un procedimento quantitativo, volto a determinare l'entità delle azioni che la struttura è in grado di sostenere con il livello di sicurezza minimo richiesto dalla presente normativa.**»

A cosa serve la valutazione della sicurezza?

La valutazione della sicurezza di un fabbricato esistente è accompagnata da apposite relazioni (indicate al §8.7.5) e permette di stabilire se:

- l'uso della costruzione possa continuare senza interventi;
- l'uso debba essere modificato (declassamento, cambio di destinazione e/o imposizione di limitazioni e/o cautele nell'uso);
- sia necessario aumentare la sicurezza strutturale, mediante interventi.

Quando si effettua una valutazione della sicurezza?



Riferimento Normativo: NTC2018 – Capitolo 8 «*Costruzioni esistenti*»

Come si interviene su un edificio esistente?

Quando si effettua una valutazione della sicurezza?

La valutazione della sicurezza deve essere eseguita quando si verifica **anche una sola** delle seguenti situazioni:

- ❖ **Riduzione evidente della capacità resistente e/o deformativa della struttura o di alcune sue parti** dovuta a: *significativo degrado e decadimento delle caratteristiche meccaniche dei materiali, deformazioni significative conseguenti anche a problemi in fondazione; danneggiamenti prodotti da azioni ambientali (sisma, vento, neve e temperatura), da azioni eccezionali (urti, incendi, esplosioni) o da situazioni di funzionamento ed uso anomali;*
- ❖ **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 passaggio ad una classe d'uso superiore;**
- ❖ **Esecuzione di interventi non dichiaratamente strutturali, qualora essi interagiscano**, anche solo in parte, **con elementi aventi funzione strutturale** e, in modo consistente, ne **riducano la capacità e/o ne modifichino la rigidità;**
- ❖ **Ogni qualvolta si eseguano gli interventi strutturali** di cui al §8.4;
- ❖ **Opere realizzate in assenza o difformità dal titolo abitativo**, ove necessario al momento della costruzione, **o in difformità alle norme tecniche per le costruzioni vigenti al momento della costruzione.**

Nella valutazione della sicurezza, il progettista dovrà esplicitare in un'apposita relazione, esprimendoli in termini di rapporto fra capacità e domanda, i livelli di sicurezza precedenti all'intervento e quelli raggiunti con esso.



$$\zeta_E = \frac{\text{Capacità}}{\text{Domanda}}$$

Riferimento Normativo: **NTC2018 – Capitolo 8 «Costruzioni esistenti»**

Come si interviene su un edificio esistente?



8.5. Definizione del modello di riferimento per le analisi

§8.5.1. - Analisi storico - critica

Ai fini di una corretta individuazione del sistema strutturale e del suo stato di sollecitazione è importante ricostruire [il processo di realizzazione](#) e le [successive modificazioni](#) subite nel tempo dalla costruzione, nonché gli eventi che l'hanno interessata.

§8.5.2. - Rilievo

Il rilievo geometrico - strutturale dovrà essere riferito alla geometria complessiva, sia della costruzione, sia degli elementi costruttivi, comprendendo i rapporti con le eventuali strutture in aderenza.

[Nel rilievo dovranno essere rappresentate le modificazioni intervenute nel tempo, come desunte dall'analisi storico-critica.](#)

Il rilievo deve individuare l'organismo resistente della costruzione, tenendo anche presenti la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costitutivi.

[Dovranno altresì essere rilevati i dissesti](#), in atto o stabilizzati, ponendo particolare attenzione all'individuazione dei [quadri fessurativi](#) e [dei meccanismi di danno](#).

§8.5.3. - Caratterizzazione meccanica dei materiali

Per conseguire un'adeguata conoscenza delle caratteristiche dei materiali e del loro degrado, ci si baserà sulla [documentazione già disponibile](#), su [verifiche visive in situ](#) e su [indagini sperimentali](#).

Le indagini dovranno essere motivate, per tipo e quantità, dal loro effettivo uso nelle verifiche.

I valori di progetto delle resistenze meccaniche dei materiali verranno valutati sulla base delle [indagini e delle prove effettuate sulla struttura](#), tenendo motivatamente conto dell'entità delle dispersioni, prescindendo dalle classi discretizzate previste nelle norme per le nuove costruzioni.

8.5. Definizione del modello di riferimento per le analisi

Conoscenza dei materiali

L'intera fase di indagine strutturale deve essere supportata dall'esecuzione di prove distruttive e non distruttive, suddivise a loro volta in base alla tipologia strutturale (calcestruzzo armato o muratura).

Prove sperimentali - <u>Muratura</u>		
Indagini non distruttive	Indagini semidistruttive	Indagini distruttive
<ul style="list-style-type: none">▪ Prove soniche▪ Prove sclerometriche su pietre e mattoni▪ Prove penetrometriche sui giunti di malta▪ Termografia	<ul style="list-style-type: none">▪ Prove endoscopiche▪ Prove a scorrimento dei giunti di malta▪ Prove con martinetti piatti	<ul style="list-style-type: none">▪ Prove di compressione diagonale▪ Carotaggi

8.5. Definizione del modello di riferimento per le analisi

§8.5.4. – Livelli di conoscenza e fattori di confidenza

Ai fini della scelta del tipo di analisi e dei valori dei fattori di confidenza si distinguono tre livelli di conoscenza ordinati per informazioni di livello crescente (geometria della struttura, dettagli costruttivi, proprietà dei materiali).

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 ²)
	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	-	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadriati	5,8-8,2	-	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	-	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

- **LC1 – Livello di conoscenza LIMITATO – FC= 1,35**

Resistenza: I valori minimi degli intervalli riportati in tabella per la tipologia muraria in considerazione.

Moduli elastici: i valori medi degli intervalli riportati in tabella.

- **LC2 – Livello di conoscenza ESTESO – FC= 1,20**

Resistenza: I valori medi degli intervalli riportati in tabella per la tipologia muraria in considerazione.

Moduli elastici: i valori medi degli intervalli riportati in tabella.

- **LC3 – Livello di conoscenza ESAUSTIVO – FC= 1,00**

1° Caso – Disponibilità di tre o più valori sperimentali.

2° Caso – Disponibilità di due valori sperimentali.

3° Caso – Disponibilità di un solo valore sperimentale.

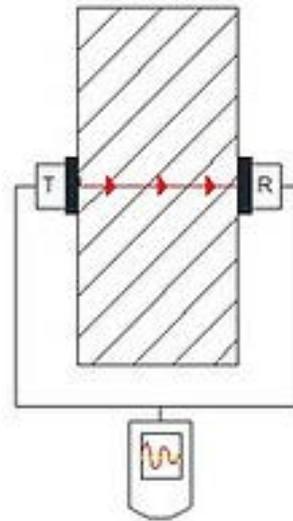
Indagini non distruttive

- Prove soniche

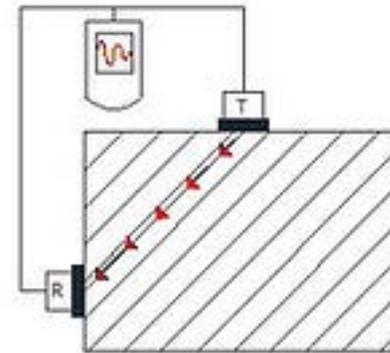
Hanno lo scopo di valutare l'omogeneità della muratura e forniscono una stima qualitativa del modulo elastico.

Le prove soniche sono basate sulla misura del tempo di propagazione di onde elastiche tra la sonda emittente e la sonda ricevente.

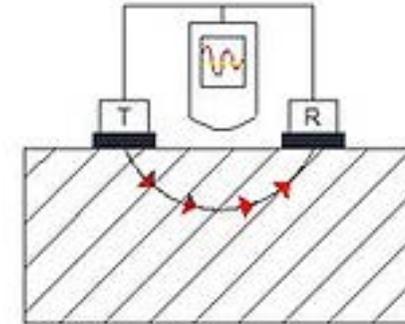
La velocità di propagazione delle onde è direttamente correlabile con le caratteristiche meccaniche e fisiche del materiale indagato. Più il materiale è compatto, più l'onda si propaga velocemente; al contrario, fessure, vuoti o degrado rallentano l'onda.



Metodo diretto



Metodo semi-diretto



Metodo indiretto

Indagini non distruttive

- Prove sclerometriche su pietre e mattoni



La **prova sclerometrica** è una prova non distruttiva che permette di determinare le caratteristiche di resistenza superficiale di materiali come il calcestruzzo e la **muratura**.

Lo sclerometro ha forma cilindrica e presenta un'asta che fuoriesce da un'estremità collegata ad una massa tramite una molla. **L'asta viene premuta sulla superficie da testare fino a che non viene raggiunto il limite della corsa. In seguito la massa sbatte sull'asta e rimbalza.**

La prova sclerometrica si basa sul **Rebound number**, ovvero sul **metodo dell'indice di rimbalzo**, ed è costituita da 4 fasi:

1. Individuare la zona di misura;
2. Pulire e levigare la superficie;
3. Eseguire almeno 12 battute sclerometriche;
4. Calcolare la media su 10 valori degli indici di rimbalzo, escludendo i valori max e min.

Indagini non distruttive

- Prove penetrometriche sui giunti di malta



Le indagini sulla resistenza delle malte rivestono una notevole importanza perché **permettono di stimare le caratteristiche meccaniche di una muratura.**

Le prove meno invasive che non richiedono il prelievo di materiale sono quelle con **infissione di una sonda** con le quali si correla la profondità di infissione nel giunto di malta ad un'energia misurabile mediante percussione o cariche esplosive.

Un penetrometro molto in uso è quello con martello propulsore unificato detto «**Sonda di Windsor – PIN**» che non fa uso di alcuna carica esplosiva: l'azione che agisce su una sonda conica metallica normalizzata è quella di un martello propulsore unificato. **La resistenza viene valutata misurando la penetrazione della sonda con diametro di 1 µm e poi facendo uso delle tabelle di correlazione fornite dal produttore.**

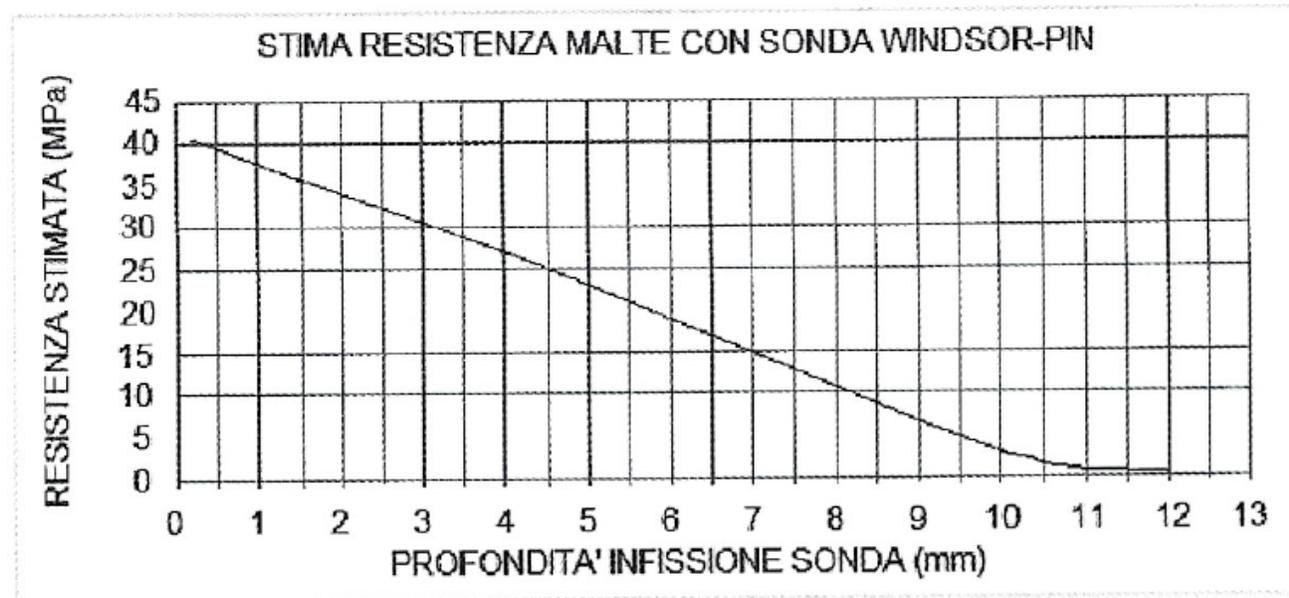


Indagini non distruttive

- Prove penetrometriche sui giunti di malta

Come si esegue la prova?

Vengono eseguite sempre più prove, **almeno 4 o 5**, su una stessa area e su aree diverse della stessa muratura per poterne mediare i risultati.



Indagini non distruttive

- Termografia

La **termografia** è un'indagine che si effettua senza alcun contatto diretto con la struttura esaminata. Essa è **basata sulla misura dell'energia termica irradiata dalla muratura nella fascia dell'infrarosso**. Dalla fisica è noto che ogni corpo che sia a temperatura superiore allo zero assoluto emette energia di cui una parte nel campo dell'infrarosso.

Secondo la **legge di Stefan - Boltzmann** l'emissione è definita dalla relazione:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

In cui:

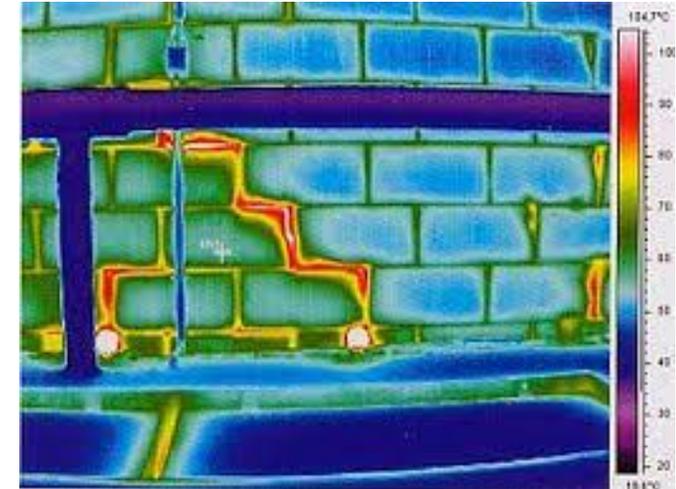
ε = emissività (valore tra 0 e 1);

σ = costante di Stefan Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8}$);

T = temperatura.

La massima energia viene emessa ad una lunghezza d'onda che per il corpo nero è definito dalla **legge di Wien**:

$$\lambda_M = Cw/T \quad (\text{con } Cw = 2,88 \text{ mm} \cdot \text{°K})$$



Indagini non distruttive

- Termografia

La muratura (con valore di emissività $\epsilon = 0,5$), alla temperatura di $25^{\circ}\text{C} = 298^{\circ}\text{K}$, ha un massimo sulla lunghezza d'onda dell'infrarosso:

$$\lambda_M = 2,88/298 = 0,010 \text{ mm}$$

Con potenza totale $E = 224 \text{ W/mq}$

L'attrezzatura essenziale per questo tipo di indagine è una fotocamera sensibile all'infrarosso capace di registrare le temperature delle superfici sulla base dell'energia emessa dall'oggetto nel campo dell'infrarosso termico.

Per poter distinguere diversi materiali è necessario che **l'oggetto non sia in equilibrio termico con l'ambiente**; tale stato può essere indotto naturalmente (irraggiamento solare, aria esterna) o indotto artificialmente con sorgenti di calore esterne.



Lo studio termografico fornisce preziose informazioni storiche degli interventi passati e non visibili e viene molto utilizzato per:

- Ricerca tipologica delle murature;
- Ricerca di elementi strutturali non visibili (catene, cordoli, capo chiavi e tessitura solai);
- Ricerca vuoti occulti;
- Presenza di umidità e di risalita capillare.



Indagini semidistruttive

- Prove endoscopiche



Delle indagini sulle murature, quella endoscopica applicata all'edilizia deriva dalle applicazioni mediche.

Si tratta di realizzare un piccolo foro nella muratura, del diametro di 30-40 mm e **infilare direttamente nel foro una sonda in grado di acquisire delle immagini visive che possono essere registrate.**

Attraverso questo esame si riescono a rilevare i componenti che costituiscono la muratura.

La strumentazione è poco ingombrante e la realizzazione di piccoli fori, per ispezionare la muratura, rende la prova poco invasiva.

Indagini semidistruttive

- Prove a scorrimento dei giunti di malta

Con la prova di scorrimento/taglio (Detta *Shove test*), **si determina la resistenza allo scorrimento della muratura (taglio τ) in presenza di carichi verticali verificando la forza necessaria a far scorrere nel piano dei giunti di malta orizzontali un mattone.**

La determinazione della tensione di taglio o scorrimento nelle murature a mattone si effettua mediante l'uso di un martinetto idraulico a spinta.

Si sceglie un mattone integro; a sinistra o a destra si crea uno spazio per l'inserimento del martinetto e sul lato opposto si realizza un ulteriore spazio in modo da isolare il mattone sottoposto a prova.



Lo scorrimento del mattone è misurato da un sensore di spostamento a cavallo della fessura libera, opposta a quella dove si è inserito il martinetto.

L'elemento di muratura sottoposto a prova viene spostato orizzontalmente mediante il martinetto e lo sforzo che causa lo scorrimento dell'elemento in prova fornisce una misura della resistenza a taglio del giunto di malta:

$$\tau = F/A$$

dove: τ è la tensione tangenziale, F è la forza applicata dal martinetto, A è l'area del mattone.

Indagini semidistruttive

- Prove con martinetti piatti



Le prove con martinetti piatti sono indagini semi - distruttive e possono essere utilizzate in due modi:

- **Martinetti singoli:** per misurare la tensione di esercizio della muratura (σ).
- **Martinetti doppi:** per misurare la resistenza a compressione, le caratteristiche elastiche e dedurre la resistenza a taglio di una muratura (f_{mk} , f_{vk} , E , G , ν).



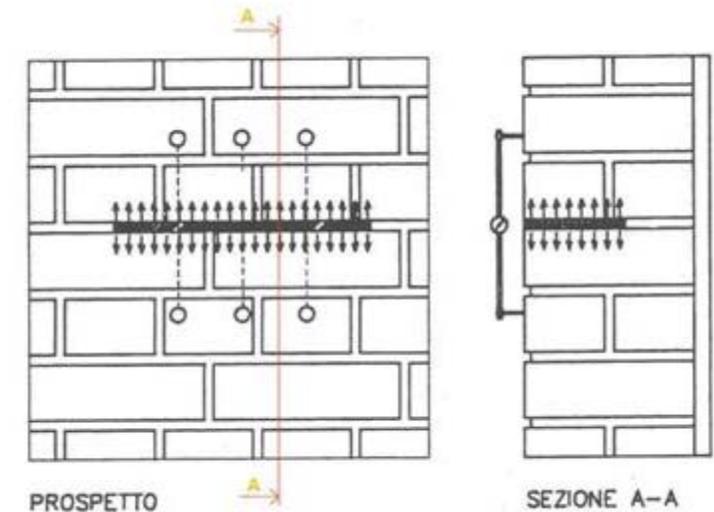
Indagini semidistruttive

- Prove con martinetti piatti – Martinetti SINGOLI

La misura dello **stato tensionale** di esercizio della muratura viene eseguita praticando un taglio orizzontale nella parete con sega circolare, avente diametro di circa 25 cm, e misurando la pressione necessaria al martinetto inserito nel taglio per riportare le basi di Invar nella loro posizione iniziale ante taglio.

Le fasi della prova sono:

- Fissare 3+3 basi di Invar a cavallo del martinetto a distanza di 40 - 50 cm circa;
- Misurare le distanze fra le basi;
- Eseguire un taglio orizzontale della muratura e collocarvi un martinetto piatto;
- Misurare la nuova distanza delle basi che si sono avvicinate per l'azzeramento delle tensioni della muratura provocate dal taglio



Indagini semidistruttive

- Prove con martinetti piatti – Martinetti SINGOLI

- Incrementare la pressione idraulica del martinetto fino al ritorno delle basi nella posizione iniziale;
- Misurare la **tensione di esercizio** della muratura leggendo la pressione al manometro ed eseguendo le correzioni necessarie a tener conto della rigidità del martinetto e del rapporto dell'area reagente del martinetto e dell'area del taglio.

$$\sigma = K_m \cdot K_a \cdot p$$

In cui:

σ = Tensione di esercizio della muratura;

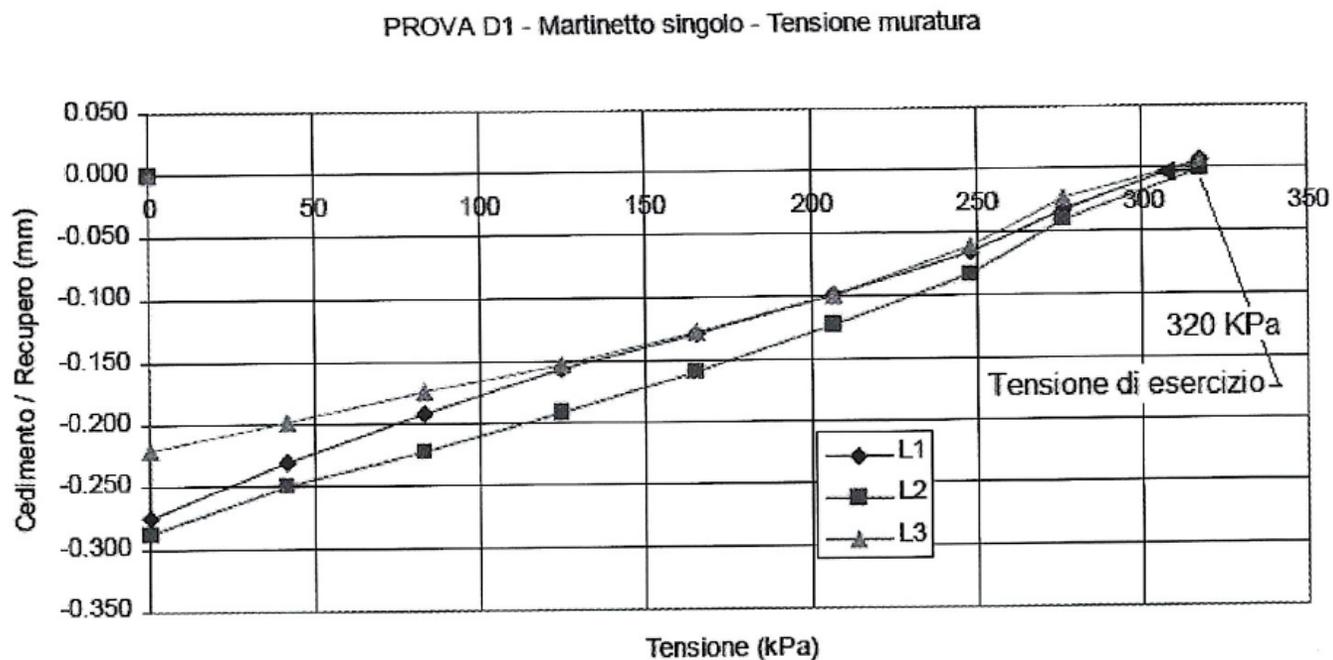
K_m = Costante del martinetto (circa 0,85);

K_a = Rapporto area martinetto/area taglio (circa 0,95);

p = Pressione idraulica del martinetto.

Indagini semidistruttive

- Prove con martinetti piatti – Martinetti SINGOLI



PROVA D1 – Martinetto singolo				
Carico KPa	Valore del cedimento/Recupero mm			Situazione
	L1	L2	L3	
0	0,00	0,00	0,00	prima del taglio
0	-0,275	-0,288	-0,221	dopo il taglio
41	-0,230	-0,250	-0,198	
83	-0,192	-0,222	-0,174	
124	-0,157	-0,192	-0,154	
166	-0,130	-0,160	-0,128	
207	-0,099	-0,123	-0,099	
248	-0,066	-0,083	-0,061	
276	-0,034	-0,042	-0,024	
317	0,006	-0,002	0,005	ritorno

Indagini semidistruttive

- **Prove con martinetti piatti – Martinetti DOPPI**

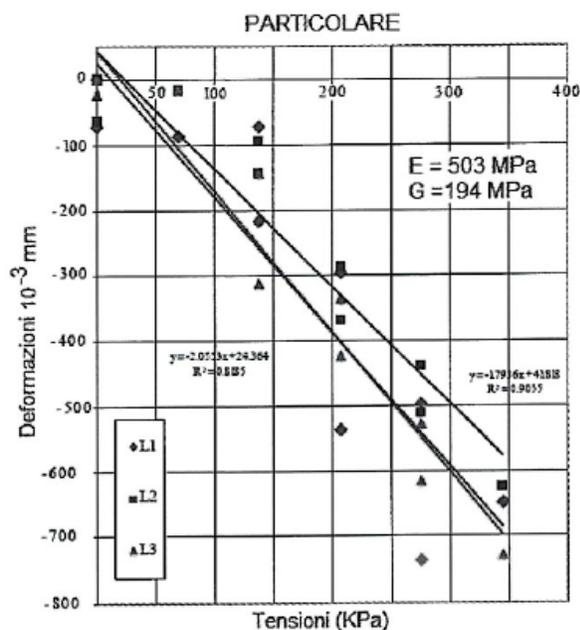
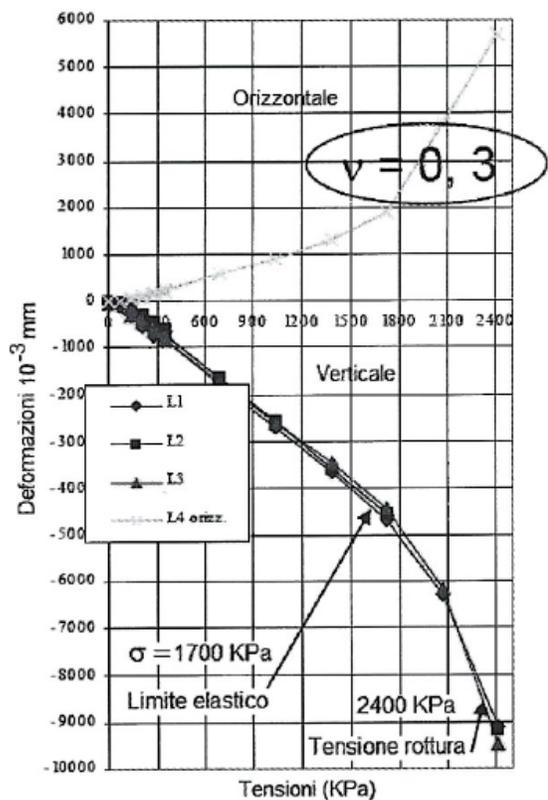
La misura delle **caratteristiche meccaniche della muratura, dei moduli elastici e il suo carico di rottura** si ottiene posizionando un secondo martinetto a distanza di circa 40 – 50 cm dal primo e due basi orizzontali (D) per la misura di deformazioni.

La porzione di muratura compresa tra i due intagli viene strumentata ed è sottoposta a cicli di carico e scarico fino a rottura. In tal modo è possibile tracciare:

- La curva tensione - deformazione per compressione verticale;
- La curva tensione - deformazione relativa alla conseguente dilatazione trasversale.

Indagini semidistruttive

- Prove con martinetti piatti – Martinetti DOPPI



PROVA D1 – Martinetto doppio					
Carico KPa	Deformazione 10 -3 mm				Situazione
	L1	L2	L3	L4 orizz.	
0	0.00	0.00	0.00	0	Azzeramento a martinetti scarichi
69	-88	-16	-16	16	
138	-216	-144	-144	32	
207	-536	-288	-366	80	
276	-736	-440	-528	136	
345	-648	-624	-728	200	
276	-496	-512	-616	160	
207	-296	-368	-424	120	
138	-72	-96	-312	64	
0	-72	-64	-24	16	Ritorno non elastico
345	-832	-720	-824	248	
690	1776-	-1656	-1712	584	
1035	-2696	-2580	-2584	896	
1380	-3672	-3584	-3472	1320	
1725	-4704	-4560	-4456	1904	
3870	-6288	-6205	-6176	3760	
3415	-9112	-9184	-9488	5704	Rottura muratura

Indagini distruttive

- Carotaggi



Nelle strutture in muratura il carotaggio è particolarmente indicato per conoscere la composizione materica e l'esatta stratigrafia dell'elemento.

In molti casi, ad esempio nelle murature a cassa vuota o a sacco, si possono effettuare microcarotaggi per consentire l'inserimento del videoendoscopio ed indagare così nelle parti interne della struttura.

Il prelievo del campione avviene mediante una carotatrice a corona diamantata e può essere condotto a secco o con acqua.

La carotatrice viene fissata alla muratura e la corona viene introdotta nell'elemento lapideo.

Il materiale estratto, a seconda della litologia e tipologia di muratura, può essere più o meno coeso e va assoggettato a prova di rottura a compressione.

Le carote estratte possono essere utilizzate anche per valutare l'effettiva evoluzione dell'umidità all'interno dello spessore del paramento murario e la diffusione dei sali.

Indagini distruttive

- Prove di compressione diagonale



Può essere svolta in sito o in laboratorio.

Nel secondo caso si deve prelevare dalla struttura un prisma di muratura.

Nel caso di **prova in situ** si deve avere disponibilità di una porzione di **murature di lato 120×120 cm e spessore dai 25 ai 70 cm.**

La prova risulta distruttiva e nel caso di esame in situ, si deve garantire la sicurezza, in quanto il pannello di prova viene tagliato e si deve poi ripristinare la muratura utilizzata per il test.

La forza viene impressa lungo la diagonale fino alla rottura del pannello.

La prova fornisce la resistenza a taglio della muratura e il modulo elastico tangenziale G .

Le tipologie di intervento

Per gli edifici esistenti è possibile distinguere **3 tipologie di interventi**:

- Interventi finalizzati al ripristino della sicurezza o interventi **locali**
- Interventi di **miglioramento** sismico volti all'aumento della sicurezza
- Interventi per l'**adeguamento** a nuove esigenze di carichi e sollecitazioni

Interventi di riparazione o interventi locali

Gli interventi di questo tipo riguardano singole parti e/o elementi della struttura.

Essi non debbono cambiare significativamente il comportamento globale della costruzione e sono volti a conseguire una o più delle seguenti finalità:

- ✓ Ripristinare, rispetto alla configurazione precedente al danno, le caratteristiche iniziali di elementi o parti danneggiate;
- ✓ Migliorare le caratteristiche di resistenza e/o di duttilità di elementi o parti, anche non danneggiati;
- ✓ Impedire meccanismi di collasso locale;
- ✓ Modificare un elemento o una porzione limitata della struttura.

Le tipologie di intervento

Interventi di miglioramento

La valutazione della sicurezza e il **progetto dell'intervento dovranno essere estesi a tutte le parti della struttura** potenzialmente interessate da modifiche di comportamento, nonché alla struttura nel suo insieme.

- A meno di specifiche situazioni relative ai beni culturali, per le costruzioni di **classe III ad uso scolastico e di classe IV il valore di ζ_E** , a seguito degli interventi di miglioramento, **deve essere comunque non minore di 0,6**.
- Per le rimanenti costruzioni di **classe III** e per quelle di **classe II il valore di ζ_E** , sempre a seguito degli interventi di miglioramento, **deve essere incrementato di un valore comunque non minore di 0,1**.

Interventi di adeguamento

L'intervento di adeguamento della costruzione è obbligatorio quando si intenda:

- Sopraelevare la costruzione;**
- Ampliare la costruzione** mediante opere ad essa strutturalmente connesse e tali da alterarne significativamente la risposta;
- Apportare variazioni di destinazione d'uso** che comportino incrementi dei carichi globali verticali in fondazione superiori al 10%;
- Effettuare interventi strutturali volti a trasformare la costruzione mediante un insieme sistematico di opere che portino ad un sistema strutturale diverso dal precedente;**
- Apportare modifiche di classe d'uso** che conducano a costruzioni di classe III ad uso scolastico o di classe IV.

Nei casi a), b) e d), per la verifica della struttura, si deve avere $\zeta_E \geq 1,0$. Nei casi c) ed e) si può assumere $\zeta_E \geq 0,80$.

Le tipologie di intervento

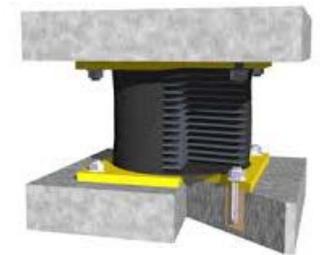
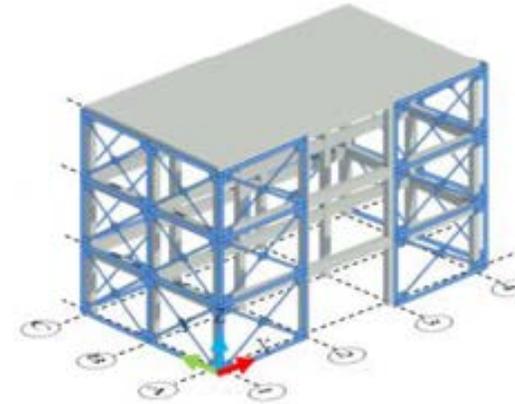
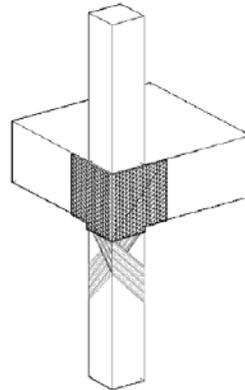
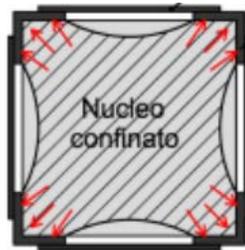
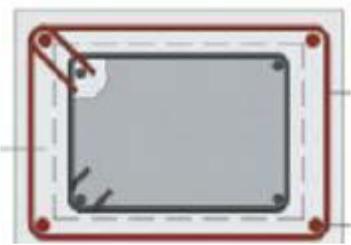
Sistemi di retrofit sismico

Interventi locali:

- Incamiciatura in c.a. o in acciaio (Calastrellature)
- Rinforzi con sistemi FRP (Fibro-rinforzati a matrice polimerica)
- Rinforzi con malte fibro-rinforzate (FRCM)
- Metodo CAM (Cucitura Attiva dei Manufatti)

Interventi globali:

- Sistemi di controllo passivo, attivo e semi-attivo che migliorano la capacità della costruzione
- Sistemi di isolamento sismico che riducono la domanda sismica



Le principali soluzioni di retrofit

Sistemi di retrofit energetico

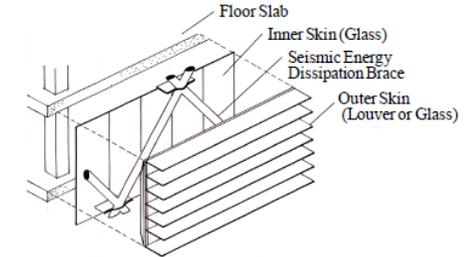
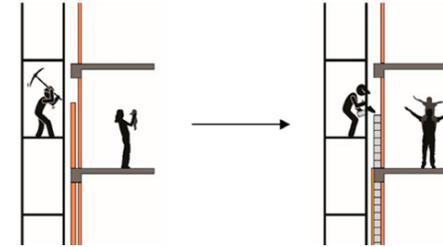
- Isolamento termico delle superfici opache
- Sostituzione infissi
- Installazione di sistemi di schermatura solare
- Sostituzione impianti di riscaldamento/raffrescamento
- Passaggio a fonti energetiche rinnovabili



Sistemi di retrofit integrato

Obiettivo: Riduzione del rischio sismico e incremento dell'efficienza energetica

- Cappotto sismico con lastre in c.a. e pannelli termoisolanti
- **Cappotto sismico con malte fibrorinforzate e pannelli termoisolanti**
- Cappotto sismico con telai metallici modulari
- Blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato (A.A.C. – Autoclaved Aerated Concrete)
- Pannelli in legno lamellare a strati incrociati (C.L.T. – Cross Laminated Timber)
- Esoscheletri in c.a. o in acciaio con sistemi di coibentazione termica
- Facciate ventilate con controventi dissipativi



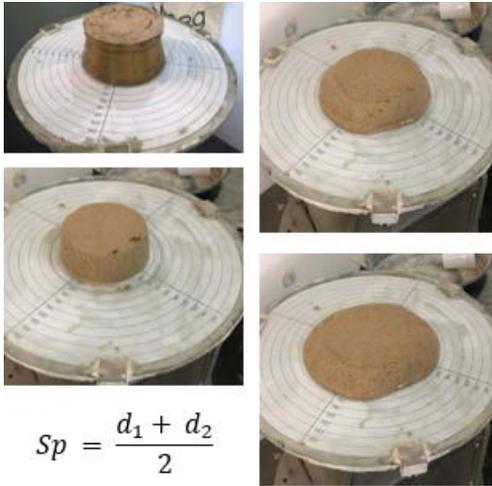
Intonaci rinforzati con fibre naturali

Materiali e mix design

ID	M15_HT	M5_HF	CSII_HS	CSII_HR
Matrice	<p>Geocalce F Antisismico, Kerakoll</p> <ul style="list-style-type: none"> NHL 3,5 (EN 459-1) M15 (EN 998-2) <p>Intonaco sismo-resistente</p> 	<p>Geocalce Tenace, Kerakoll</p> <ul style="list-style-type: none"> NHL 3,5 (EN 459-1) M5 (EN 998-2) <p>Intonaco tradizionale</p> 	<p>Biocalce Intonaco, Kerakoll</p> <ul style="list-style-type: none"> NHL 3,5 (EN 459-1) CSII (EN 998-1) <p>Intonaco tradizionale</p> 	<p>Biocalce Intonaco, Kerakoll</p> <ul style="list-style-type: none"> NHL 3,5 (EN 459-1) CSII (EN 998-1) <p>Intonaco tradizionale</p> 
Componente fibroso	<ul style="list-style-type: none"> D = 0,4 mm L = 2/3 cm 0,25-1,5% 	<ul style="list-style-type: none"> D = 0,02-0,05 mm (grezza) L = 2/3 cm 0,25-1% 	<ul style="list-style-type: none"> D = 1 mm L = 2/3 cm 0,5-3% 	<ul style="list-style-type: none"> D = 2,2 mm L = 2/3 cm 1-3% 

Intonaci rinforzati con fibre naturali

Prova di lavorabilità

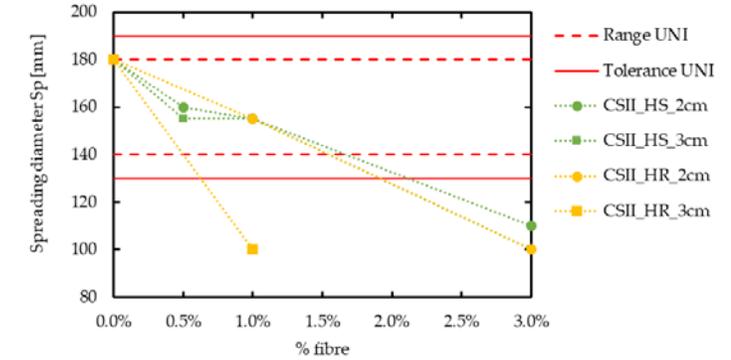
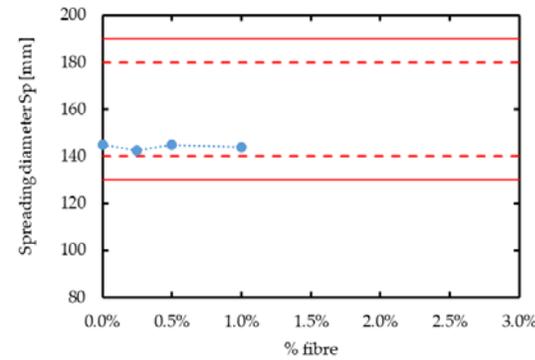
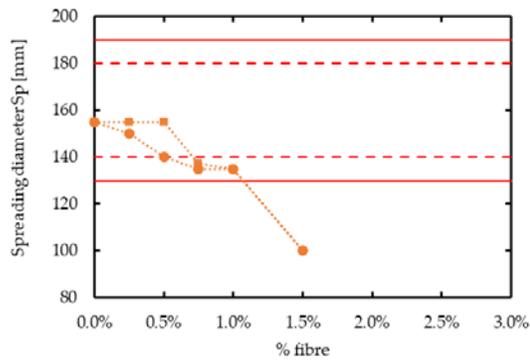
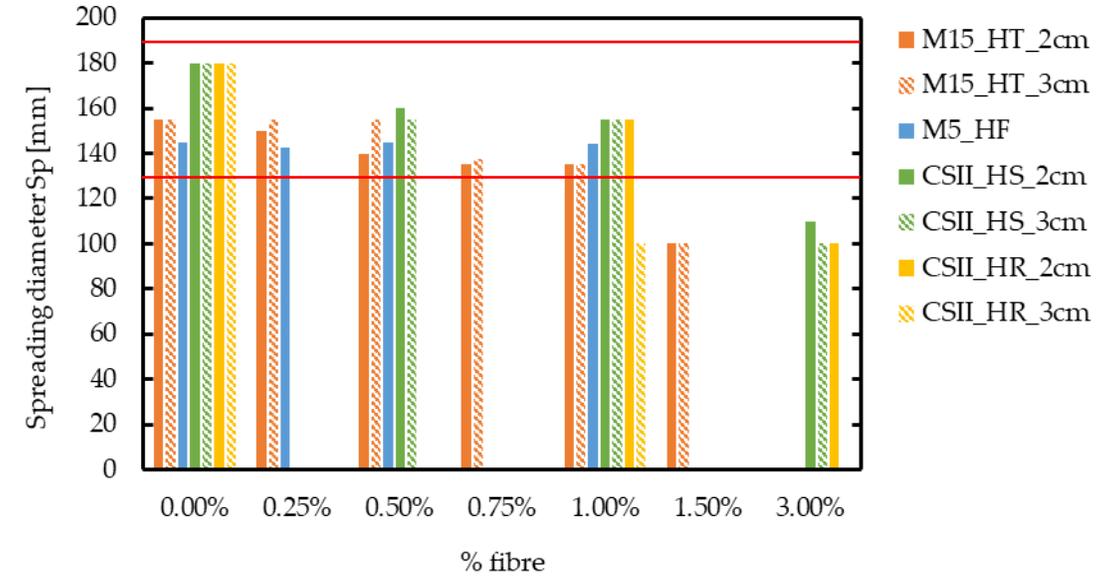


Range di spandimento per una buona lavorabilità dell'intonaco

$$140 \text{ mm} < Sp < 180 \text{ mm} \quad (\pm 10 \text{ mm})$$

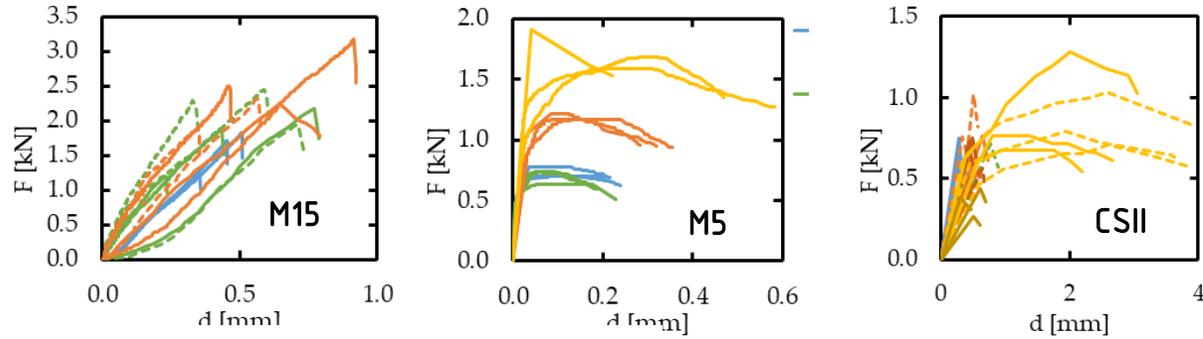
UNI 998-1/2: 2016

$$Sp = \frac{d_1 + d_2}{2}$$



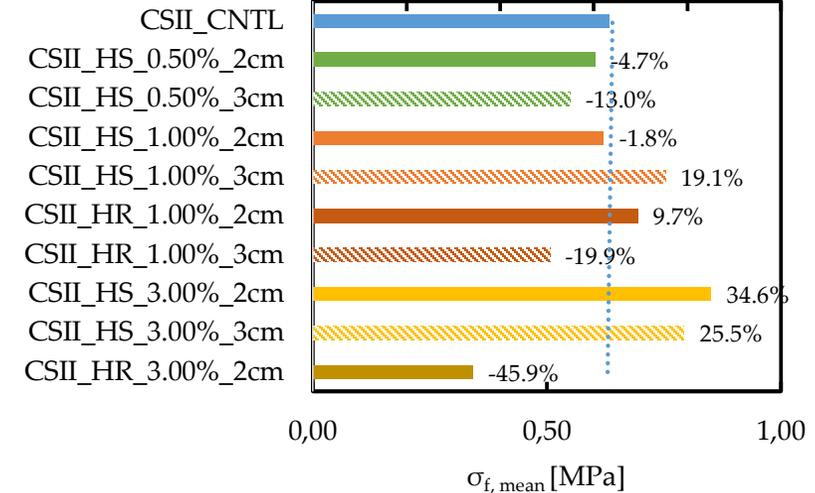
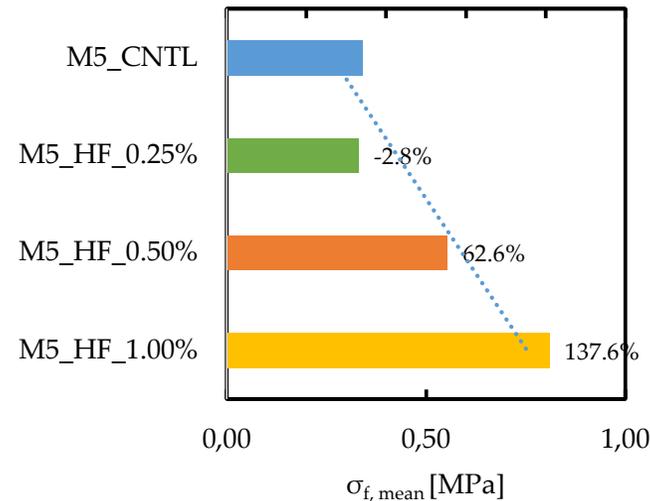
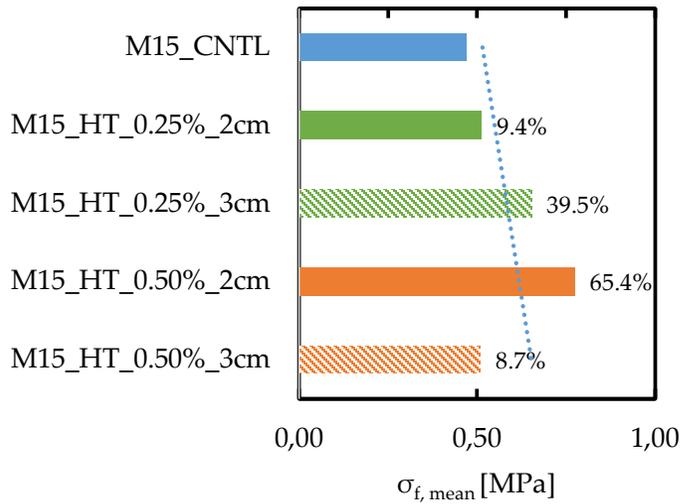
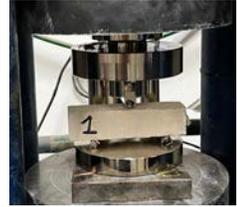
Intonaci rinforzati con fibre naturali

Prova di flessione su tre punti



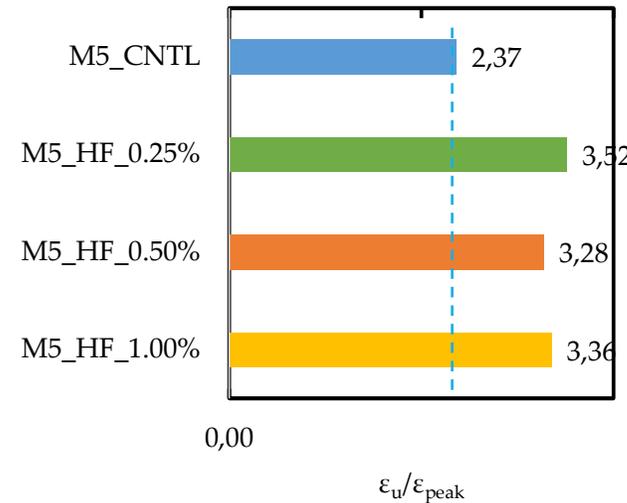
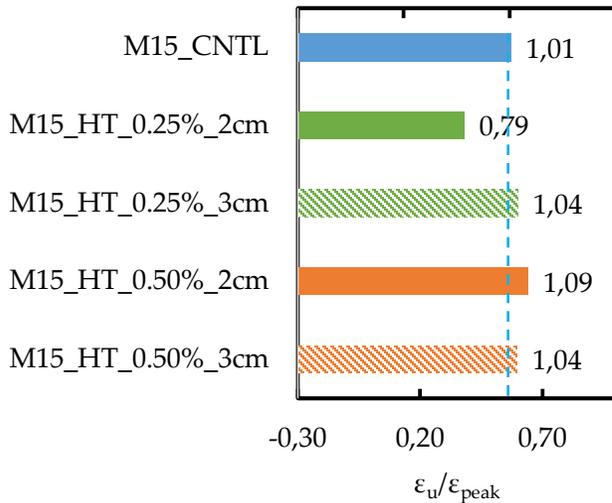
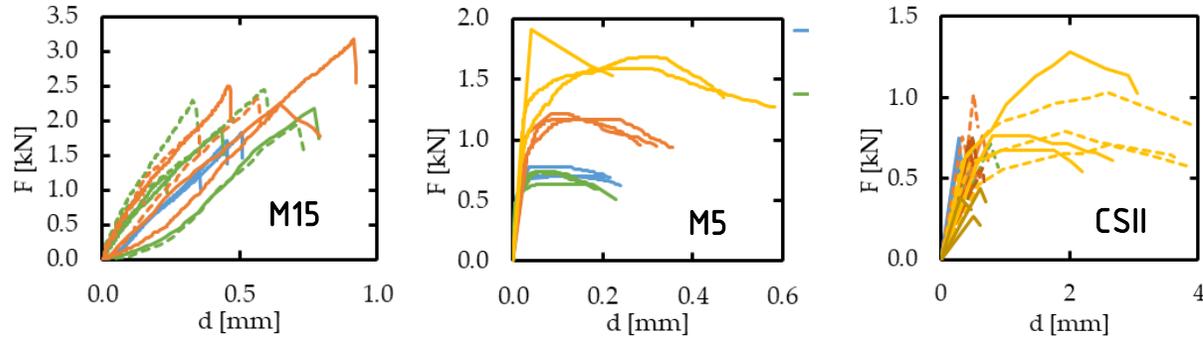
Incremento resistenza a flessione rispetto al provino non rinforzato (CNTL):

- M15 = tutte le percentuali di fibre
- M5 = tutte eccetto 0.25%
- CSII con fibre da 1 mm = solo 1%_3 cm
- CSII con fibre da 2.2 mm = tutte eccetto 1%_3 cm, 3%_2 cm



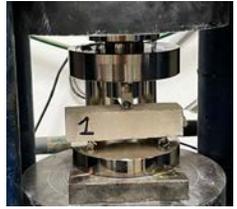
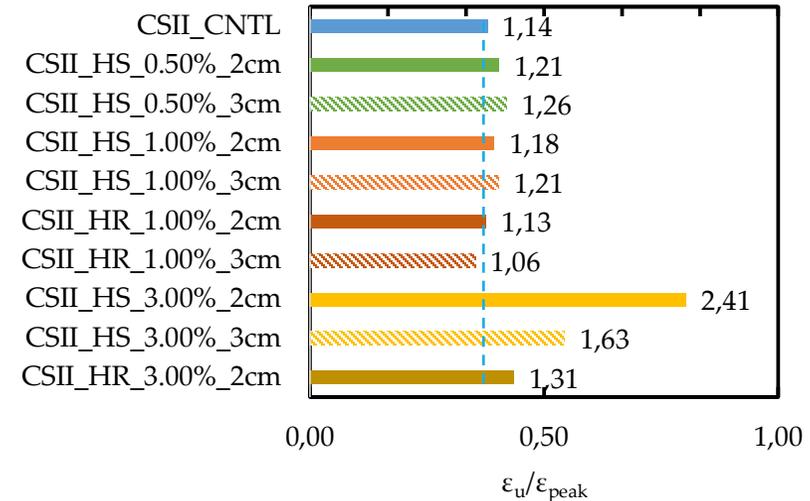
Intonaci rinforzati con fibre naturali

Prova di flessione su tre punti



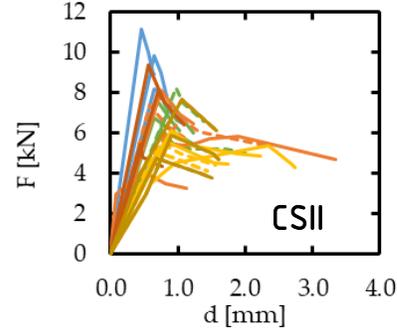
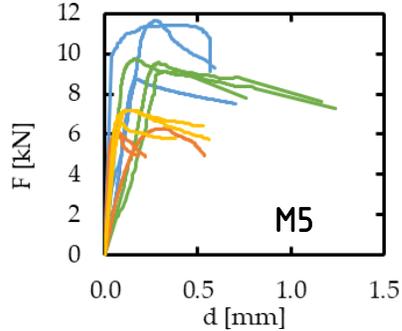
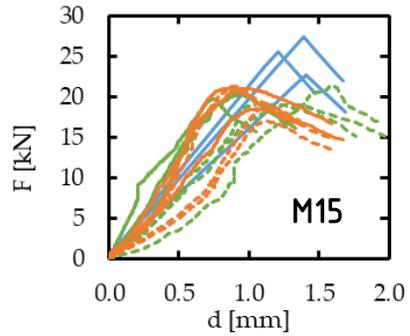
Incremento rapporto **deformazione ultima/di picco** rispetto al provino non rinforzato (CNTL):

- M15 = tutte le percentuali di fibre eccetto 0,25%
- M5 = tutte le percentuali di fibre
- CSII = tutte le percentuali di fibre eccetto 1% da 2,2 mm



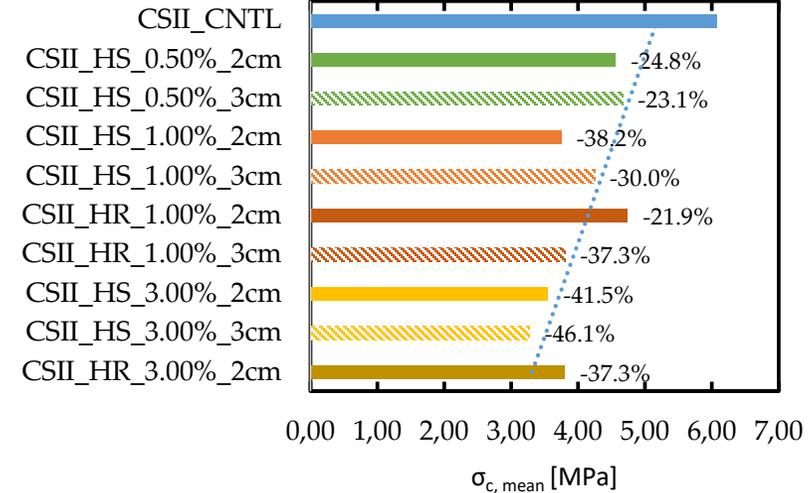
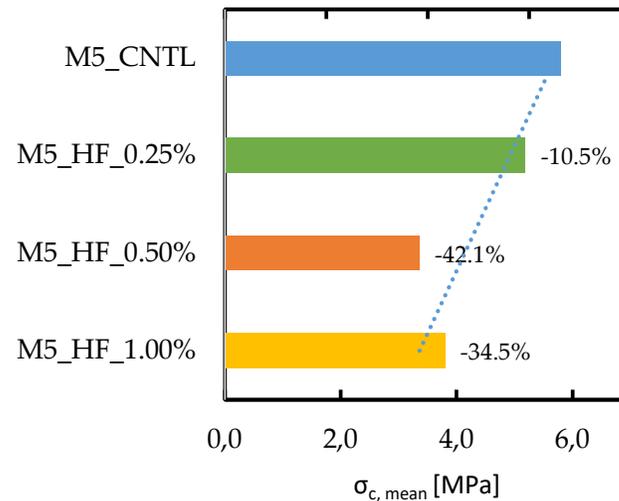
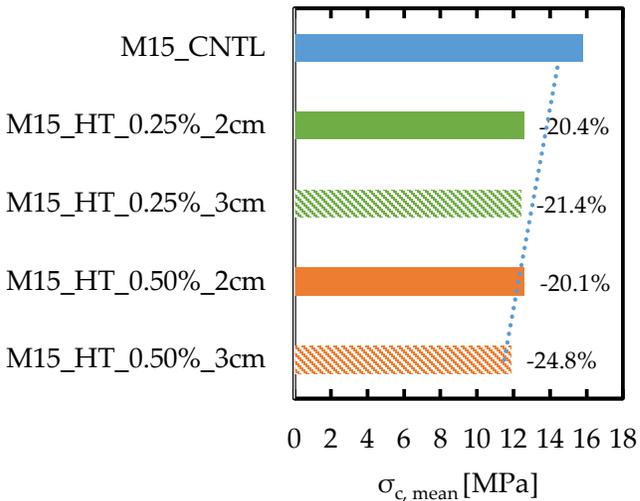
Intonaci rinforzati con fibre naturali

Prova di compressione



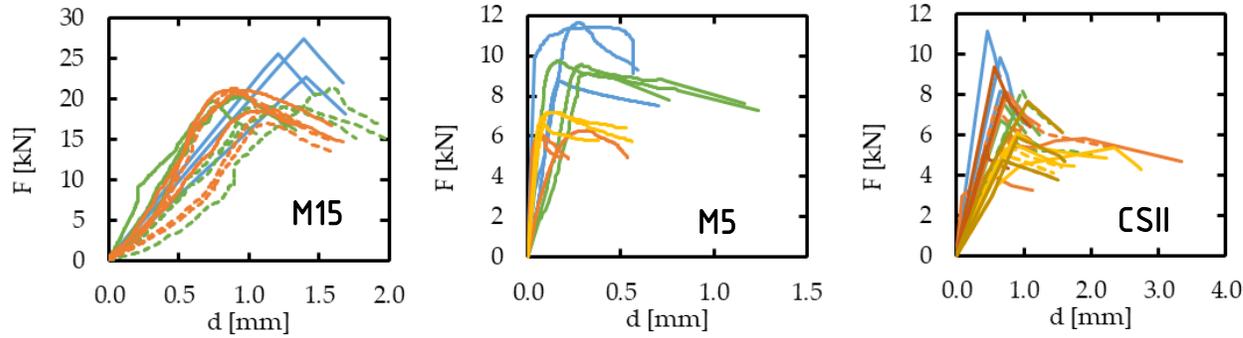
Riduzione **resistenza a compressione** rispetto al provino non rinforzato (CNTL):

- M15 = tutte le percentuali di fibre
- M5 = tutte le percentuali di fibre
- CSII = tutte le percentuali di fibre



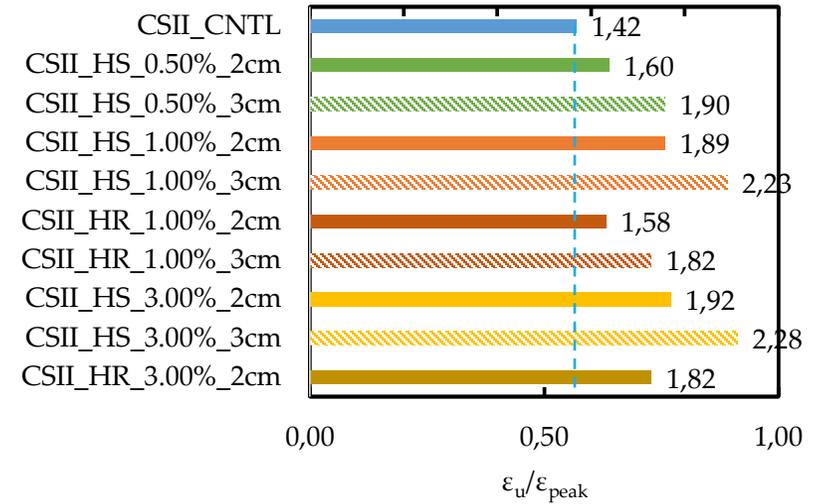
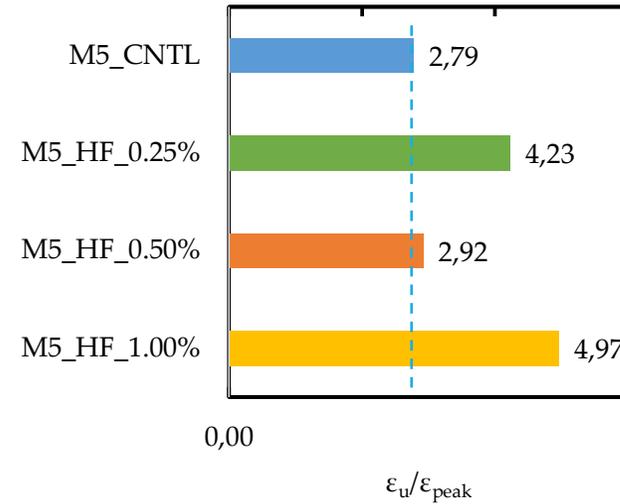
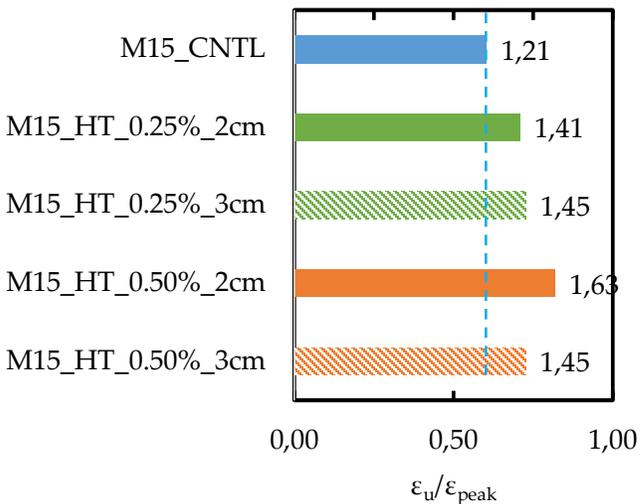
Intonaci rinforzati con fibre naturali

Prova di compressione



Incremento rapporto **deformazione ultima/di picco** rispetto al provino non rinforzato (CNTL):

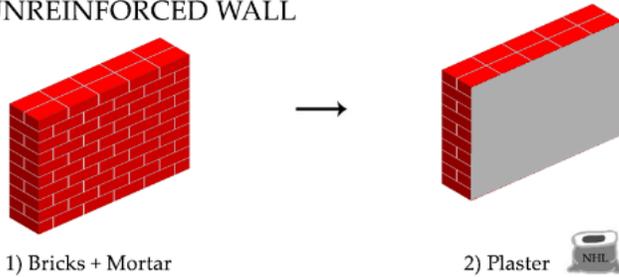
- M15 = tutte le percentuali di fibre
- M5 = tutte le percentuali di fibre
- CSII = tutte le percentuali di fibre



Intonaci rinforzati con fibre naturali - FRCM

Materiali e preparazione provini

UNREINFORCED WALL



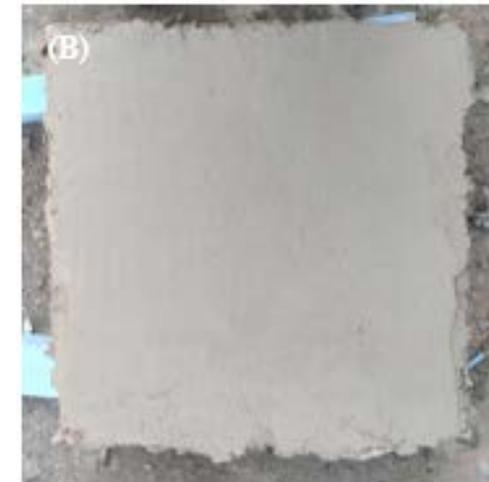
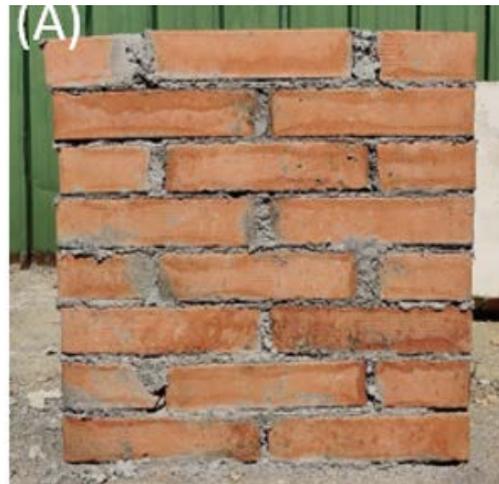
Mattoni pieni Stabila s.r.l.
12x25x5.5 mm
Resistenza a compressione: 38.15 N/mm²



Malta per muratura Finbond Multimalta (SACES s.r.l.)
Resistenza a compressione : 18.17 N/mm²



Intonaco Geocalce F Antisismico, Kerakoll
NHL 3,5 (EN 459-1)
M15 (EN 998-2)



MURETTO NON RINFORZATO

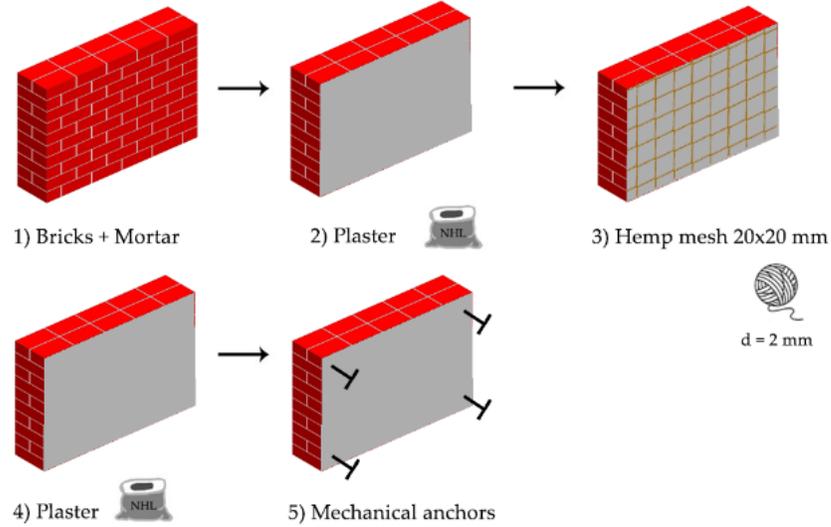
50x50x12 cm

Intonacato su entrambe le facce

Intonaci rinforzati con fibre naturali - FRCM

Materiali e preparazione provini

REINFORCED WALL

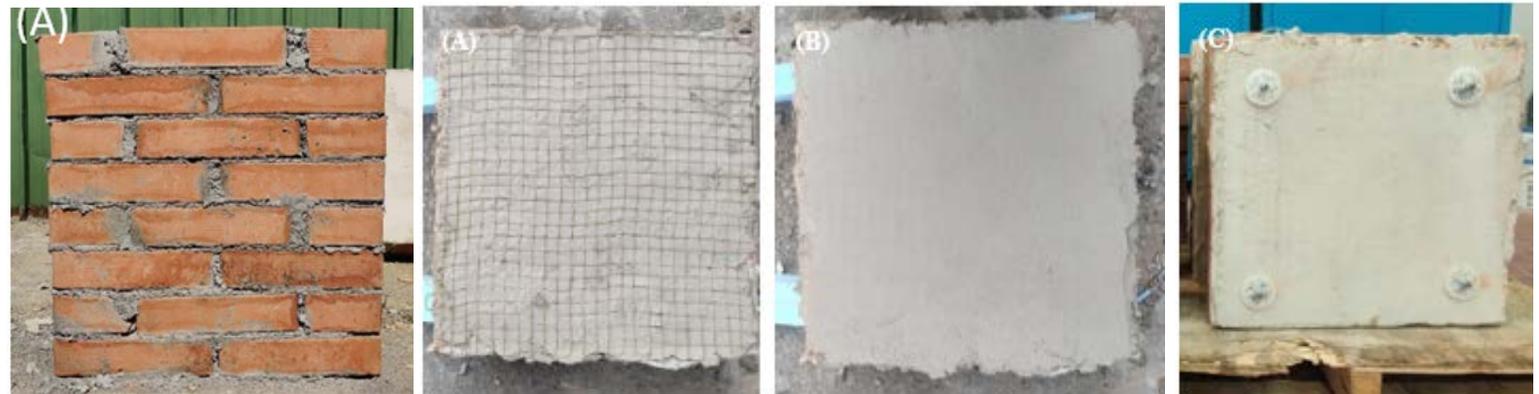


Fibra di canapa CORDERIA CASTALDO
D = 2 mm

Rete in fibra di canapa 20x20 mm



REINFORCED WALL 50x50x12 cm (rinforzati con FRCM in fibra di canapa su entrambi i lati)



Intonaci rinforzati con fibre naturali - FRCM

Prova di compressione

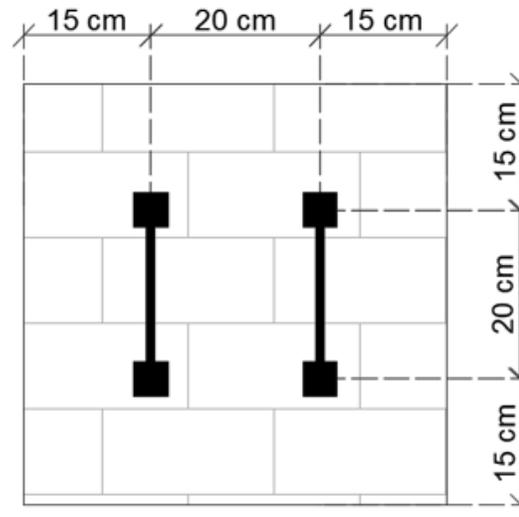
PROVINI



Control_01



Reinf_01



Per leggere lo spostamento nella direzione di carico, sono stati posizionati due trasduttori su ciascun lato della parete.



Sono stati applicati due strati di malta per regolarizzare le sezioni a contatto con la macchina di prova.



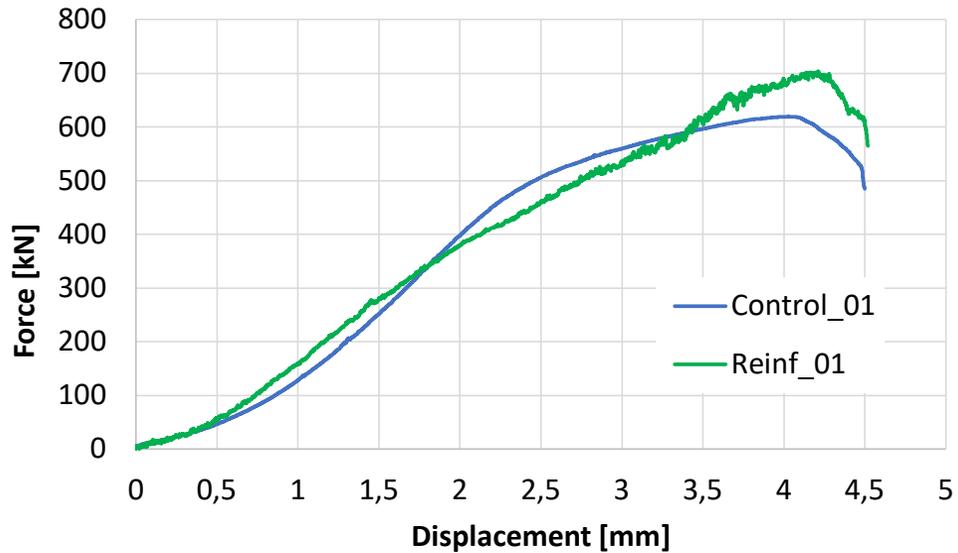
Macchina Universale da 500 kN MTS 810

UNI EN 12390-3:2019

Gradiente di carico 50 N/s

Intonaci rinforzati con fibre naturali - FRCM

Prova di compressione



- aumento della forza ultima = circa il 14%
- aumento dello spostamento ultimo al picco di forza = circa il 5%
- stesso valore di duttilità = 2

Control_01



- Espulsione strati di intonaco
- Lesioni verticali
- Rottura mattoni

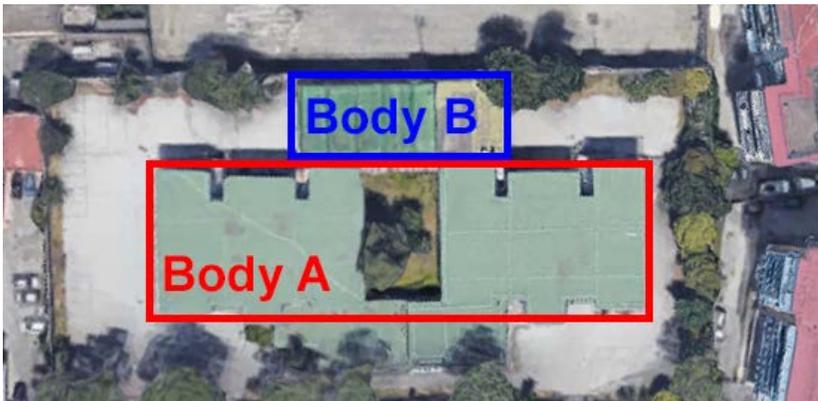
Reinforced_01



- Nessuna lesione significativa
- Quadro fessurativo capillare
- No collasso fuori piano intonaco

Caso studio 2: Sistema FRCM su edificio in muratura

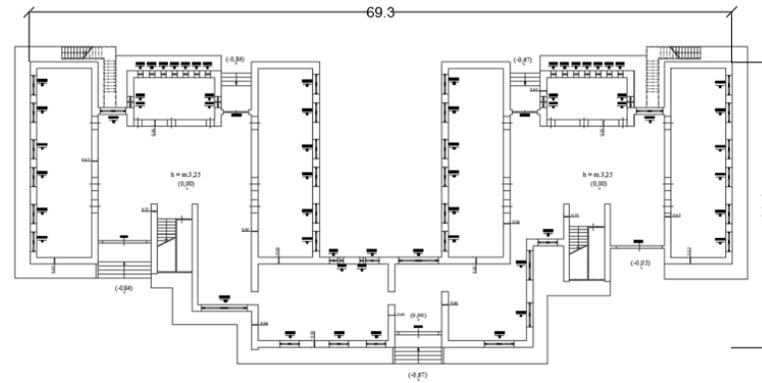
Istituto Massaia di San Giorgio a Cremano (NA)



Corpo A = muratura

Corpo B = c.a.

Corpo A

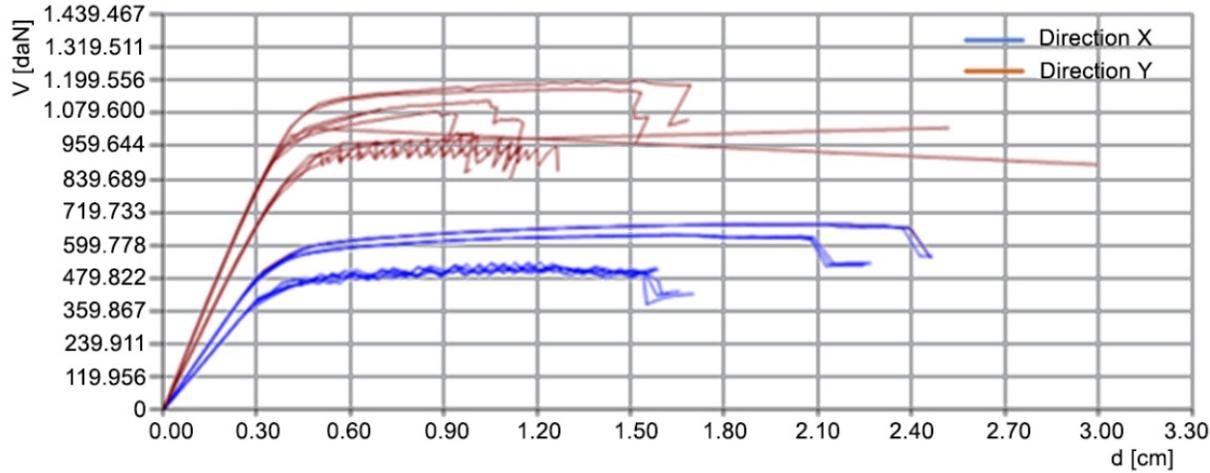


- Muratura in tufo giallo napoletano (sp. 55 – 65 cm)
- Solai latero-cementizi



Caso studio 2: Sistema FRCM su edificio in muratura

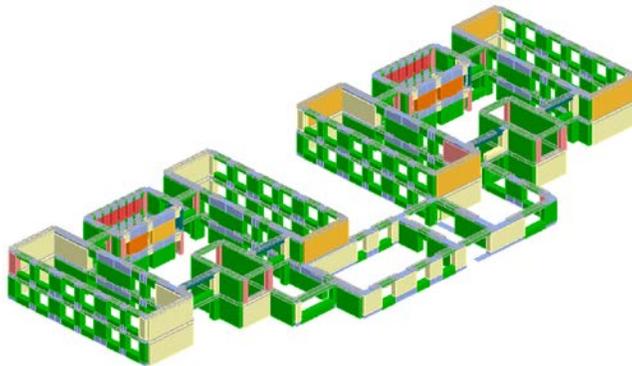
Analisi Stato di Fatto



Legend

Masonry

- No damage
- incipient plasticity
- Shear plastic
- Incipient shear failure
- Shear failure
- Compressive-bending plastic
- Incipient compressive-bending failure
- Compressive-bending failure
- Serious crisis
- Compressive failure
- Tensile failure
- Elastic failure
- Ineffective element

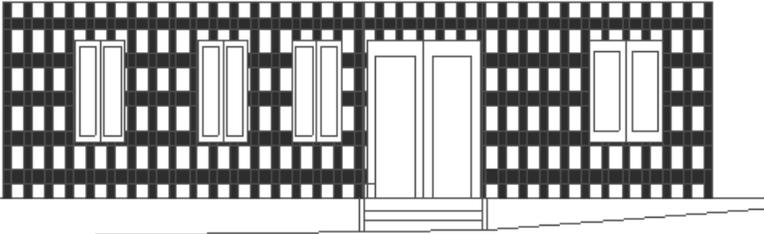


Direzione X
 Meccanismi di collasso più rilevanti dei pannelli in muratura all'ultimo piano dovuti a pressoflessione e taglio



Caso studio 2: Sistema FRCM su edificio in muratura

FRP con rete in fibra di canapa



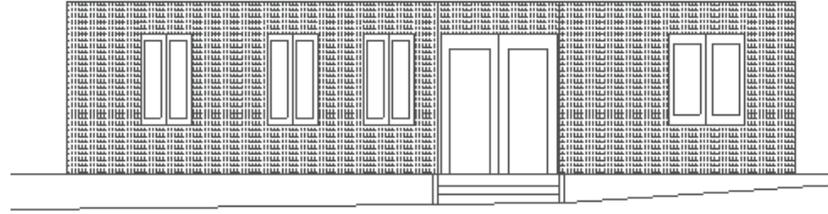
Geometria:

- Numero di strati = 3
- Spessore = 0.3 mm
- Larghezza = 30 cm
- Interasse = 50 cm

Materiale:

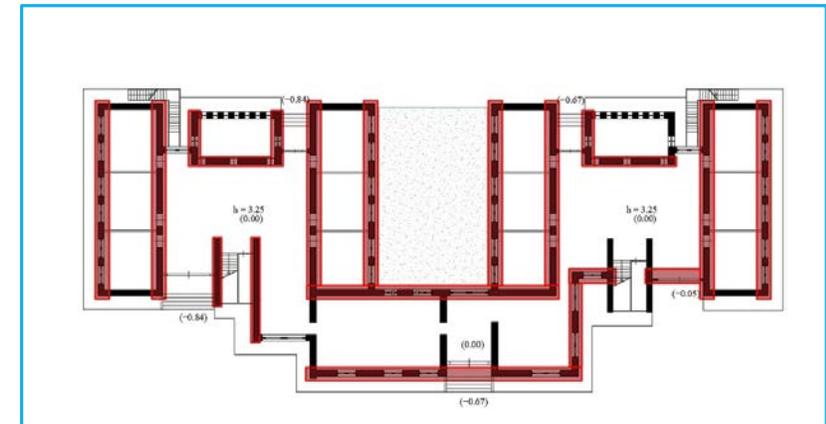
- $E_f = 42$ GPa
- $f_d = 83.5$ MPa
- $\varepsilon_d = 1.7\%$

FRCM con rete in fibra di canapa



Materiale:

- $E_f = 11.6$ GPa
- $f_d = 71.75$ MPa
- $\varepsilon_d = 1.8\%$



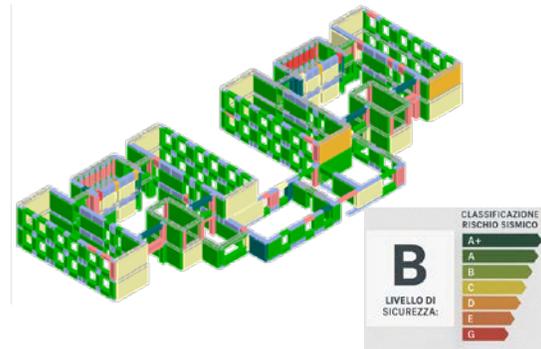
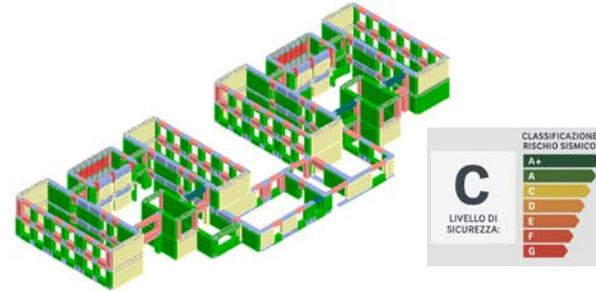
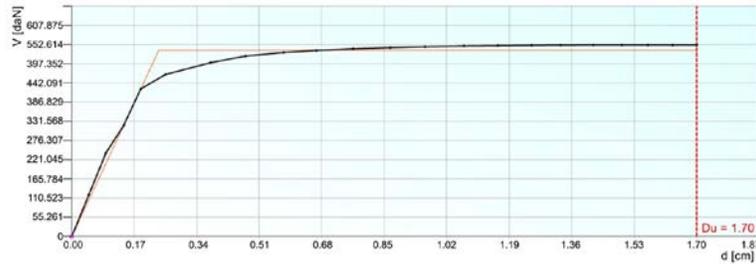
Caso studio 2: Sistema FRCM su edificio in muratura

FRP con rete in fibra di canapa

Direzione X

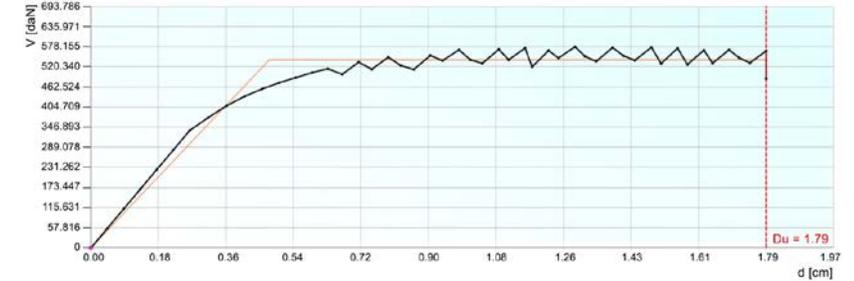


Direzione Y

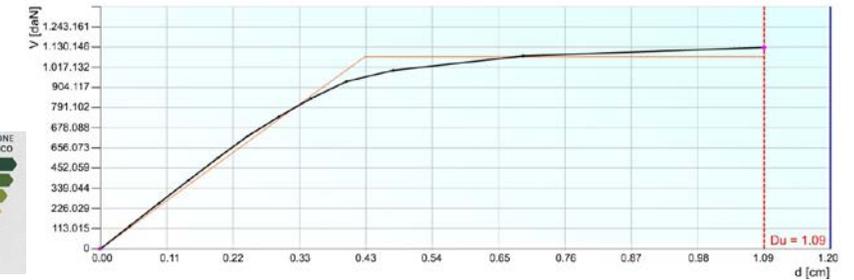


FRCM con rete in fibra di canapa

Direzione X



Direzione Y



Direzione	Stato Ante α_{SLV}	Stato Post α_{SLV} (FRP)	Δ	Stato Post α_{SLV} (FRCM)	Δ
X	0.59	0.72	+ 0.13	0.64	+ 0.05
Y	0.62	0.86	+ 0.24	0.71	+ 0.09

GRAZIE PER LA
CORTESE ATTENZIONE