



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Trento



Terremoti in Trentino

Studi e strumenti per la riduzione del rischio sismico

Strutture esistenti e interventi antisismici

Ing. Fabio Ferrario

Sala di Rappresentanza del Consiglio Regionale del Trentino Alto-Adige

Piazza Dante 16

martedì 14 maggio 2024



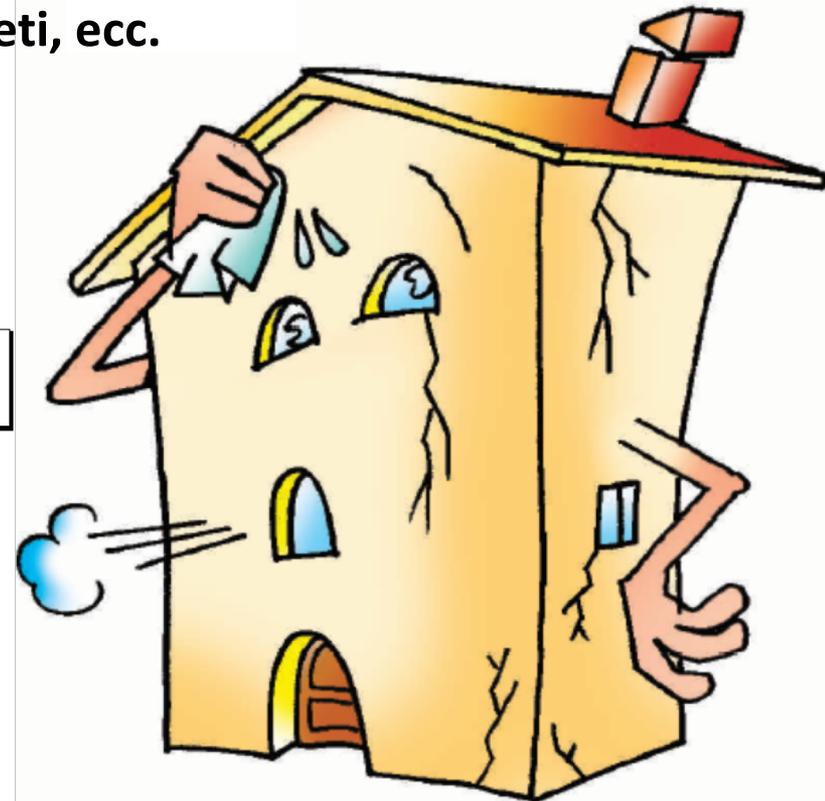
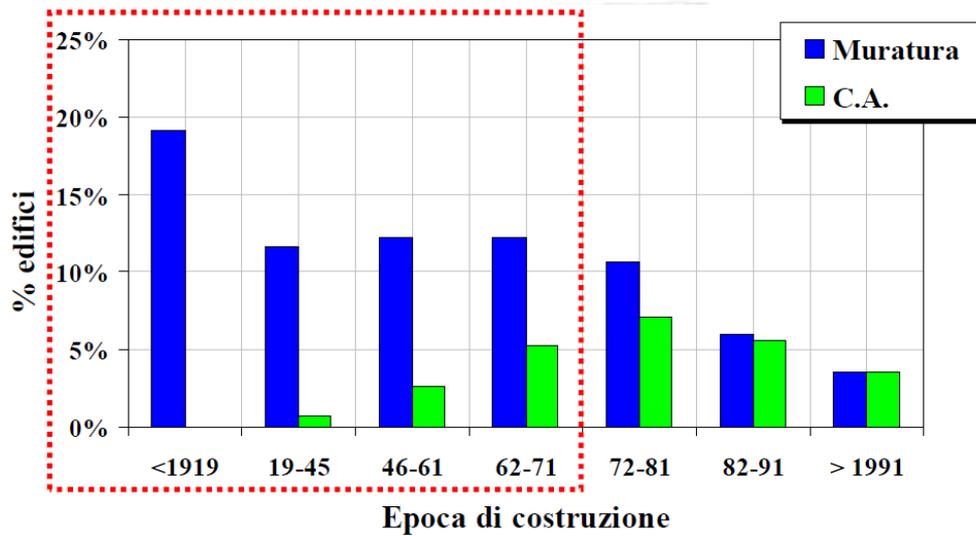
VULNERABILITÀ

La **vulnerabilità sismica** rappresenta la predisposizione di una costruzione, di una infrastruttura o di una parte del territorio a **subire danni per effetto di un sisma** di prefissata entità.



CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE CHE INFLUENZANO LA VULNERABILITA'

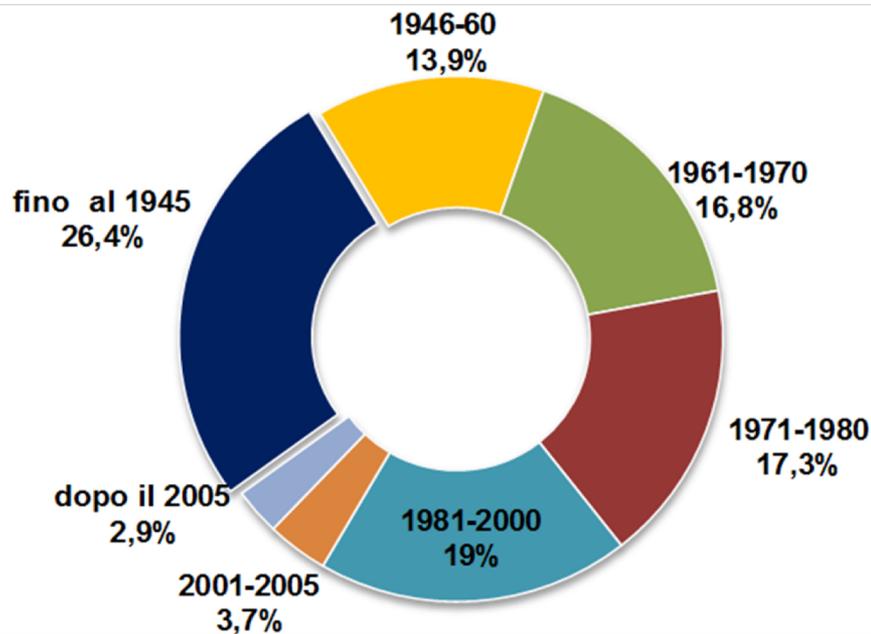
- Età di costruzione → classificazione sismica, norme tecniche
- Materiale: muratura, cemento armato, acciaio, ecc.
- Schema resistente: struttura a telai, pareti, ecc.
- Altezza della struttura
- Stato di conservazione
- Dettagli costruttivi
- ...



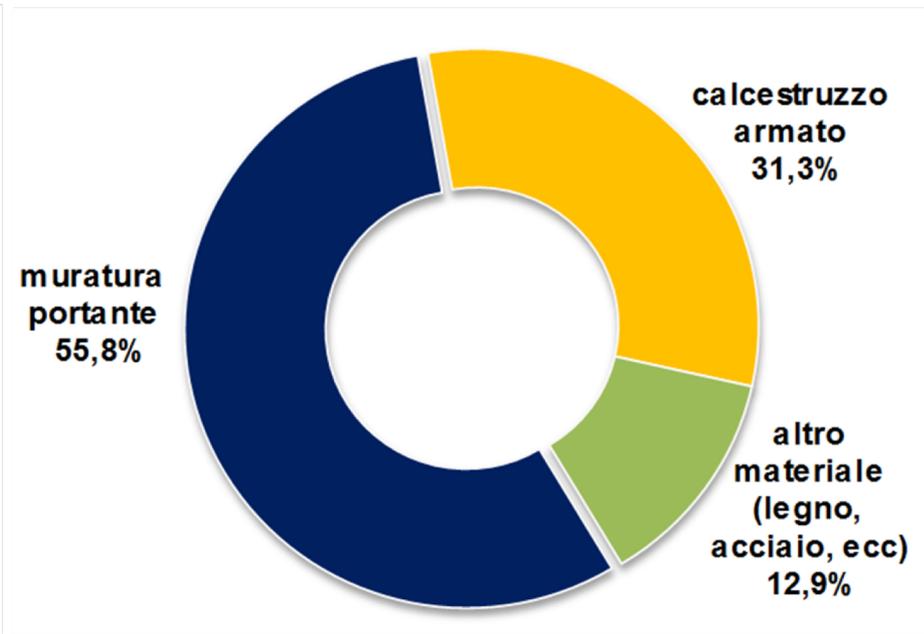


CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE CHE INFLUENZANO LA VULNERABILITA'

EPOCA DI COSTRUZIONE



STRUTTURA PORTANTE



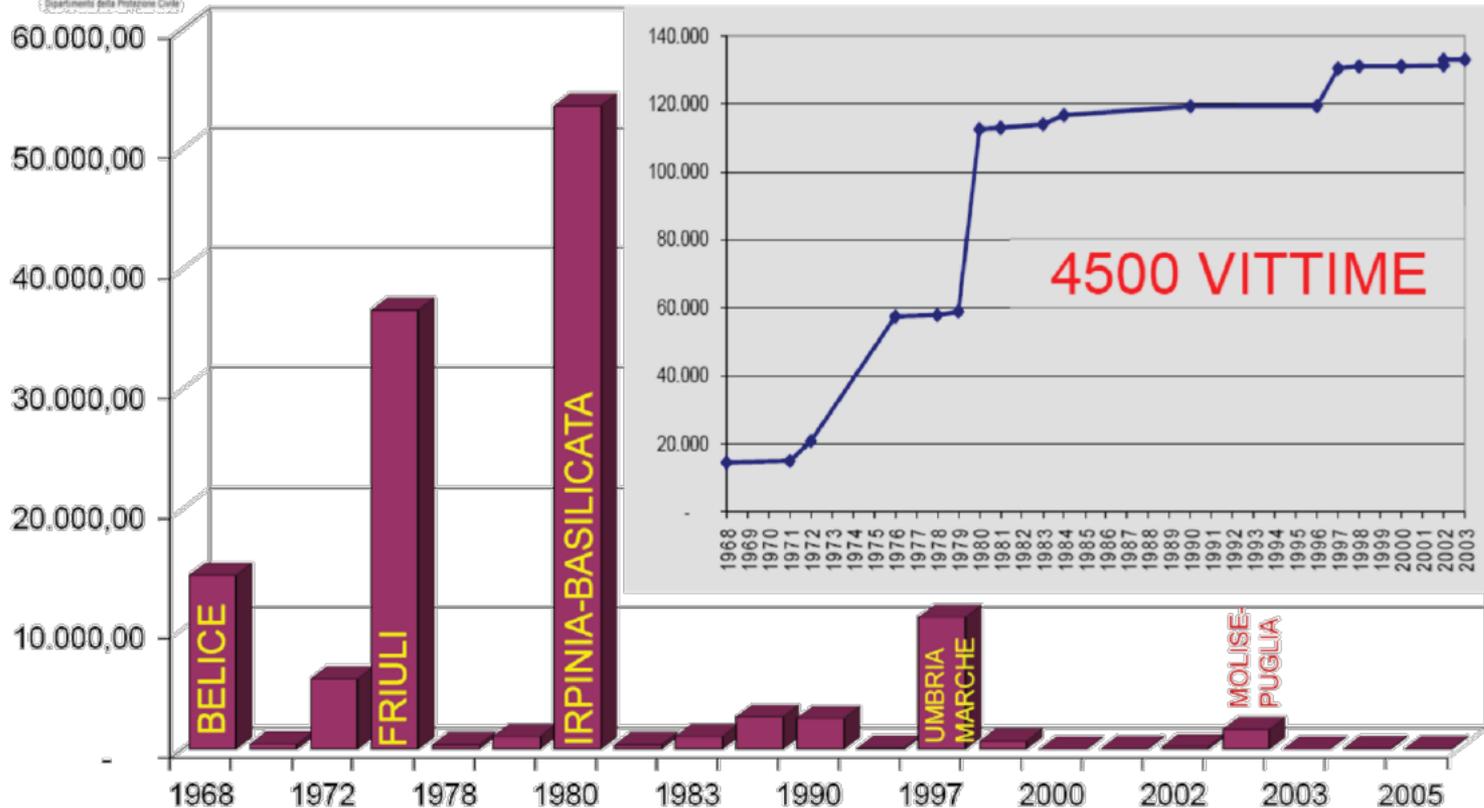
Un patrimonio residenziale obsoleto



VULNERABILITÀ



COSTO TERREMOTI ITALIANI - ULTIMI 45 ANNI (M€-2005)

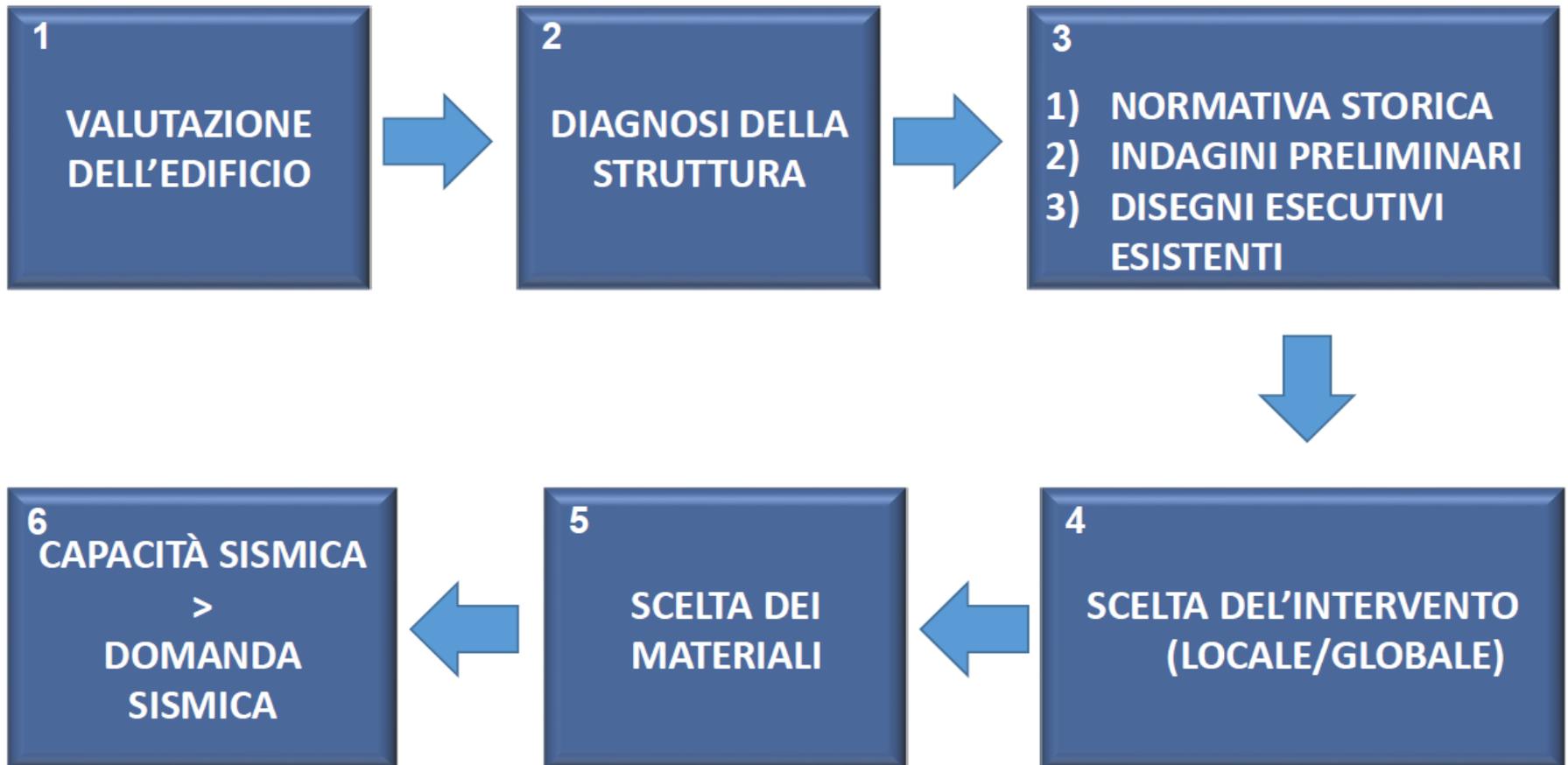


+ ABRUZZO'09 + EMILIA'12 ~ € 160 Mld → 3-3,5 Mld €/an.

Fonte: Prof. Mauro Dolce – Protezione Civile



METODOLOGIA DI VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ / SICUREZZA SISMICA





VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

8.3. VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

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. L'incremento del livello di sicurezza si persegue, essenzialmente, operando sulla concezione strutturale globale con interventi, anche locali.

La valutazione della sicurezza, argomentata con apposita relazione, deve permettere 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.

La valutazione della sicurezza deve effettuarsi quando ricorra 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.



VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

La valutazione della sicurezza degli edifici esistenti, per quanto possibile, deve essere effettuata in rapporto a quella richiesta per gli edifici nuovi. A tale scopo, le NTC introducono due nuovi parametri che costituiscono fattori indicativi per un rapido confronto tra l'azione sopportabile da una struttura esistente e quella richiesta per il nuovo:

- ζ_E , definito come il rapporto tra l'azione sismica massima sopportabile dalla struttura e l'azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione sul medesimo suolo e con le medesime caratteristiche (periodo proprio, fattore di comportamento ecc.). Il parametro di confronto dell'azione sismica da adottare per la definizione di ζ_E è, salvo casi particolari, l'accelerazione al suolo $a_g S$.
- $\zeta_{v,i}$, definito come il rapporto tra il valore massimo del sovraccarico verticale variabile sopportabile dalla parte i-esima della costruzione e il valore del sovraccarico verticale variabile che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione.

Nel caso in cui l'inadeguatezza di un'opera si manifesti nei confronti delle azioni non sismiche, quali carichi permanenti e altre azioni di servizio combinate per gli stati limite ultimi secondo i criteri esposti nel § 2.5.3 delle NTC (eventualmente ridotte in accordo con quanto specificato al § 8.5.5 delle NTC), è necessario adottare gli opportuni provvedimenti, quali ad esempio limitazione dei carichi consentiti, restrizioni all'uso e/o esecuzione di interventi volti ad aumentare la sicurezza, che consentano l'uso della costruzione con i livelli di sicurezza richiesti dalle NTC. Gli interventi da effettuare per eliminare le vulnerabilità più importanti possono anche essere parziali e/o temporanei, in attesa di essere completati nel corso di successivi interventi più ampi, atti a migliorare/adequare complessivamente la costruzione e/o parti di essa.

Attesa l'aleatorietà dell'azione, nel caso in cui l'inadeguatezza di un'opera si manifesti nei confronti delle azioni sismiche, le condizioni d'uso, la necessità e la conseguente programmazione dell'intervento sono stabiliti sulla base di una pluralità di fattori, quali: la gravità dell'inadeguatezza e le conseguenze che questa comporterebbe anche in termini di pubblica incolumità



LIVELLI DI CONOSCENZA E FATTORI DI CONFIDENZA

Dati necessari alla identificazione del livello di conoscenza

GEOMETRIA

da rilievi, inclusi rilievi sul quadro fessurativo

DETTAGLI COSTRUTTIVI

- verifiche *in situ limitate*
- verifiche *in situ estese ed esaustive*

PROPRIETA' DEI MATERIALI

- indagini *in situ limitate*
- indagini *in situ estese*
- indagini *in situ esaustive*



GEOMETRIA

La conoscenza della geometria strutturale di edifici esistenti in muratura deriva di regola da **operazioni di rilievo**.

Tale operazione comprende il rilievo, piano per piano, di **tutti gli elementi in muratura e di eventuali nicchie, cavità, canne fumarie, il rilievo delle volte, dei solai e della copertura**, delle scale, la individuazione dei carichi gravanti su ogni elemento di parete e la tipologia delle fondazioni

La rappresentazione dei risultati del rilievo verrà effettuata attraverso piante, alzati e sezioni.

Dovrà inoltre essere **rilevato e rappresentato l'eventuale quadro fessurativo, e deformativo**.

La finalità è di consentire, nella successiva fase diagnostica, l'individuazione dell'origine e delle possibili evoluzioni delle problematiche strutturali dell'edificio.



DETTAGLI COSTRUTTIVI

I dettagli costruttivi da esaminare sono normalmente relativi ai seguenti elementi:

- a) qualità del collegamento tra pareti verticali;
- b) qualità del collegamento tra orizzontamenti e pareti ed eventuale presenza di cordoli di piano o di altri dispositivi di collegamento;
- c) esistenza di architravi strutturalmente efficienti al di sopra delle aperture;
- d) presenza di elementi strutturalmente efficienti atti ad eliminare le spinte eventualmente presenti;
- e) presenza di elementi, anche non strutturali, ad elevata vulnerabilità;
- f) tipologia della muratura (a un paramento, a due o più paramenti, con o senza collegamenti trasversali...), e sue caratteristiche costruttive (eseguita in mattoni o in pietra, regolare, irregolare...).

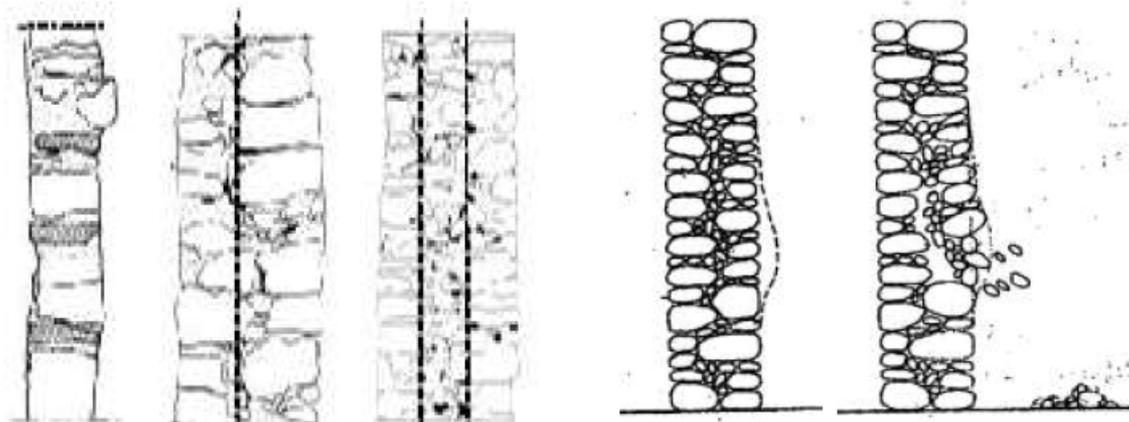




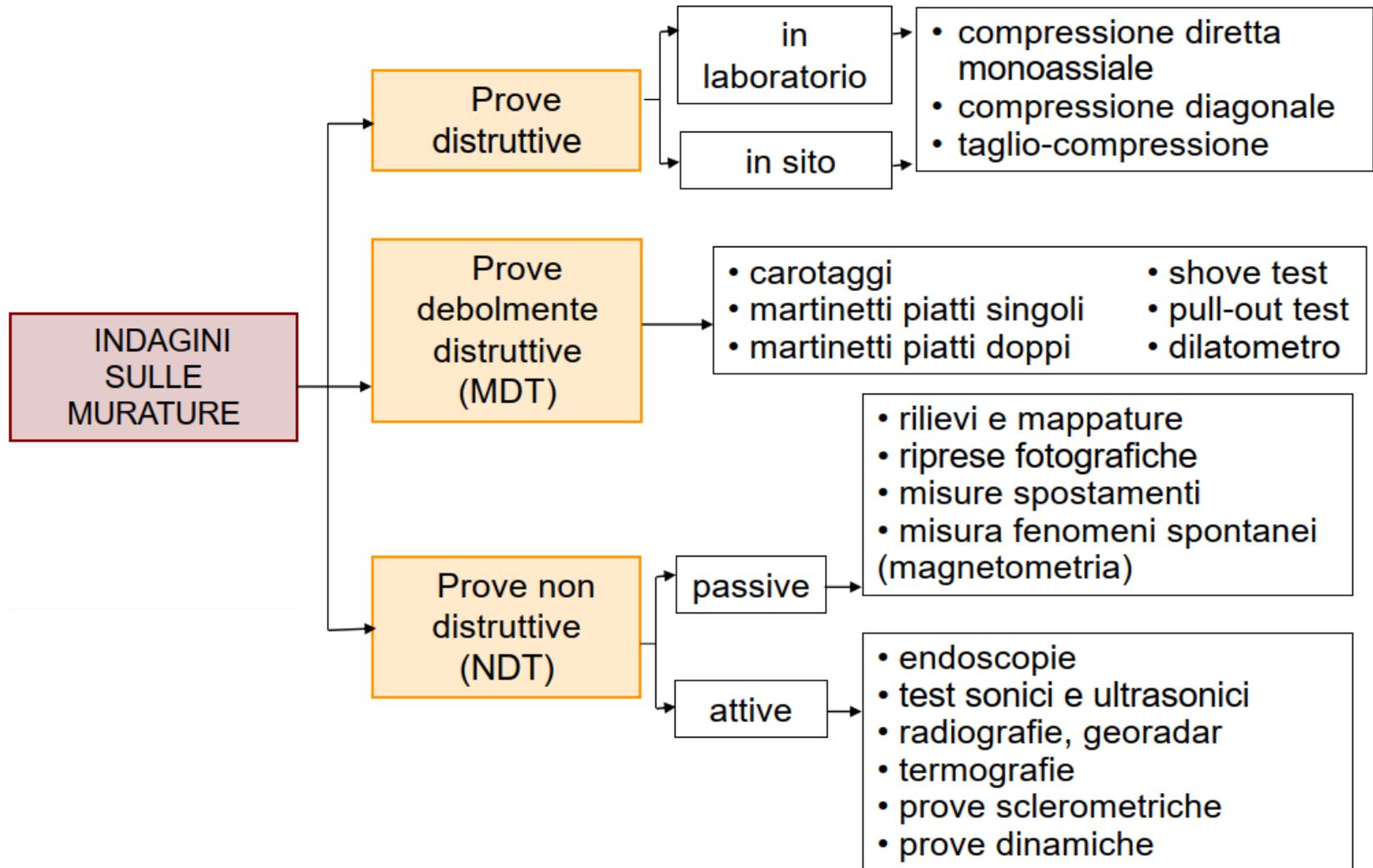
PROPRIETÀ DEI MATERIALI

Particolare attenzione dovrà essere riservata alla **valutazione della qualità muraria**, con riferimento agli aspetti legati al rispetto o meno della “**regola dell’arte**” (presenza o meno di elementi di collegamento trasversali - es. diatoni -, la forma, tipologia e dimensione degli elementi, la tessitura, l’orizzontalità delle giaciture, il regolare sfalsamento dei giunti, la qualità e consistenza della malta).

Importante risulta anche la caratterizzazione di malte (tipo di legante, tipo di aggregato, rapporto legante/aggregato, livello di carbonatazione), e di pietre e/o mattoni (caratteristiche fisiche e meccaniche) mediante prove sperimentali.



PROPRIETÀ DEI MATERIALI





LIVELLI DI CONOSCENZA E FATTORI DI CONFIDENZA

Sulla base degli approfondimenti effettuati nelle fasi conoscitive, saranno individuati i **livelli di conoscenza (LC)** dei parametri coinvolti nel modello (geometria, dettagli costruttivi e materiali), e definiti i correlati **fattori di confidenza (FC)**, da utilizzare come ulteriori coefficienti parziali di sicurezza che tengono conto delle carenze nella conoscenza dei parametri del modello

Si riconoscono tre diversi livelli di conoscenza, attraverso i quali è possibile definire i valori medi dei parametri meccanici:

LC1	raggiunto quando siano stati effettuati il rilievo geometrico, verifiche in situ limitate sui dettagli costruttivi ed indagini in situ limitate sulle proprietà dei materiali; il corrispondente fattore di confidenza è $FC=1.35$.	FC = 1.35
LC2	raggiunto quando siano stati effettuati il rilievo geometrico, verifiche in situ estese ed esaustive sui dettagli costruttivi ed indagini in situ estese sulle proprietà dei materiali; il corrispondente fattore di confidenza è $FC=1.2$.	FC = 1.20
LC3	raggiunto quando siano stati effettuati il rilievo geometrico, verifiche in situ estese ed esaustive sui dettagli costruttivi, indagini in situ esaustive sulle proprietà dei materiali; il corrispondente fattore di confidenza è $FC=1$.	FC = 1.00



TIPOLOGIE E PARAMETRI MECCANICI DELLE MURATURE

Tabella C8.5.I - 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	τ_0	f_{v0}	E	G	w
	(N/mm ²)	(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 sbazzati, 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 squadrati	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



LA “GERARCHIA DELLE RESISTENZE” NELLE MURATURE

La **muratura tradizionale**, categoria nella quale ricade gran parte delle murature esistenti, **non è un materiale** nel senso moderno del termine, cioè **il risultato di un processo industriale**.

Si tratta, invece, di un **prodotto artigianale**, che può presentarsi con varianti e declinazioni dipendenti dal luogo, dall'epoca di realizzazione, dall'importanza dell'edificio, dall'abilità delle maestranze impegnate per la sua realizzazione, ecc.

La muratura può essere definita:

- assemblaggio, più o meno ordinato e razionale, di elementi distinti (i blocchi di muratura)
- con interposizione di un legante, la malta, che quasi mai ha avuto una funzione vera e propria di legante, ma serviva solo a regolarizzare le superfici di appoggio tra gli elementi

RISULTATO: materiale con caratteristiche molto particolari, tra cui la non resistenza a trazione, la non linearità nei suoi comportamenti, la disomogeneità e l'anisotropia.



LA “GERARCHIA DELLE RESISTENZE” NELLE MURATURE

Per poter condurre analisi strutturali in termini meccanici **bisogna poter escludere la possibilità** (spesso, purtroppo, assai concreta) che la **costruzione non riesca a fornire alcun tipo di risposta strutturale**, perché qualsiasi comportamento meccanico viene anticipato dal **fenomeno della disgregazione muraria**.

Tale evento si presenta spesso, durante i sismi, nelle costruzioni con muratura di scadente qualità (ad esempio: malta povera, elementi di forma irregolare e dimensioni medio-piccole, paramenti scollegati tra loro); sotto l'effetto di azioni dinamiche e cicliche rilevanti la muratura è incapace di **“tenere insieme” gli elementi** che la costituiscono e si disgrega.





LA “GERARCHIA DELLE RESISTENZE” NELLE MURATURE

In tutti questi casi, quelli cioè in cui una insufficiente qualità meccanica della muratura non consente di avere una risposta di tipo strutturale, il **comportamento** delle costruzioni può essere chiamato “**di tipo disgregativo**”.

Se invece la muratura, grazie alla coesione e all’ingranamento derivante dalla tessitura e dalla tipologia costruttiva, ha qualità meccaniche sufficienti per rispondere - senza disgregarsi - all’azione sismica che la sollecita, allora possono instaurarsi **meccanismi resistenti e/o movimenti reciproci di porzioni murarie che si mantengono integre**. In particolare, possono formarsi dei **meccanismi cinematici** fra elementi che, in genere, si sconnettono in corrispondenza di punti deboli della muratura (finestre, lesioni preesistenti, riseghe di pareti, innesti di solai, etc...). Tali porzioni murarie hanno la **possibilità di ruotare o scorrere reciprocamente**, ed il moto si attiva quando è superato quel determinato valore dell’azione sismica che trasforma la struttura in un cinematismo. Si parla, in questi casi, di un comportamento per **meccanismi “di tipo locale”**.



LA “GERARCHIA DELLE RESISTENZE” NELLE MURATURE

Se la qualità muraria è tale da poter confidare su un comportamento meccanico sufficiente (non disgregativo), e se, in aggiunta, i collegamenti sono efficaci e diffusi nell'intero edificio, allora (e solo allora) si può parlare di **comportamento per meccanismi “di tipo complessivo”, o “di tipo globale”, della struttura.**

Esso consiste nella capacità delle pareti murarie di opporsi all'azione sismica mediante un meccanismo d'insieme, dove ciascun elemento fornisce un proprio contributo.

Da quanto appena detto discende, in linea generale, una strategia di analisi e progettazione degli interventi per gli edifici esistenti in muratura, che può essere denominata (in analogia con quanto fatto per gli edifici in c.a.):

“gerarchia delle resistenze” per le costruzioni murarie.



LA “GERARCHIA DELLE RESISTENZE” NELLE MURATURE

STEP	Situazione strutturale		Comportamento sismico	Analisi più adatta	Intervento prioritario
0	Muratura di qualità meccanica insufficiente		Disgregazione muratura	Valutazione qualità muraria	Migliorare la qualità della muratura e la sua coesione interna
1	Muratura di sufficiente qualità Assenza di collegamenti efficaci		Locale (formazione di cinematismi)	Analisi cinematica dei meccanismi di collasso Analisi per carichi verticali (solai, copertura) Ricognizione delle vulnerabilità locali	Inserire vincoli (catene, collegamenti, etc...) Rinforzare solai e coperture (ove necessario) Eliminare vulnerabilità
2	Muratura di sufficiente qualità e presenza di collegamenti efficaci e diffusi sull'intera costruzione	Impalcati deformabili	Complessivo (risposta d'insieme e carichi per zone d'influenza) Assenza di effetti torcenti globali	Analisi non lineare con modello 3D Analisi non lineare per allineamenti	Migliorare resistenza e capacità deformativa degli elementi resistenti
		Impalcati rigidi	Globale (risposta d'insieme e carichi proporzionali alle rigidità) Presenza di effetti torcenti globali	Analisi non lineare con modello 3D	Migliorare resistenza e capacità deformativa degli elementi resistenti



ANALISI DELLA QUALITÀ MURARIA - L'INDICE IQM

Accertata l'importanza che assume l'argomento, sorge il problema di come fare a valutare la migliore o peggiore qualità meccanica di una muratura per evitare primariamente il fenomeno della disgregazione.

Uno strumento che può risultare utile per questo tipo di analisi è costituito dal metodo **dell'Indice di Qualità Muraria (IQM)**, proposto da **A. Borri** (*Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Perugia*) e **A. De Maria** (*Servizio Rischio Sismico, Regione Umbria*) già nel 2002-2003, in una ricerca per la Regione Umbria e perfezionato poi in ambito di progetto di ricerca ReLUIS.

Il metodo proposto conduce ad un indice numerico di qualità muraria (IQM) distinto in base alle tre possibili direzioni dell'azione sollecitante il generico pannello murario; gli indici di qualità muraria di una muratura sono quindi tre:

1. IQM_V per azioni verticali
2. IQM_{FP} per azioni orizzontali fuori piano
3. IQM_{NP} per azioni orizzontali nel piano



ANALISI DELLA QUALITÀ MURARIA - L'INDICE IQM

I valori numerici di tali indici dipendono dal rispetto o meno di alcune condizioni relative alla corretta ed efficace messa in opera della muratura: i cosiddetti **parametri della “regola dell’arte”**. I parametri considerati sono:

- ✓ MA. qualità della malta / efficace contatto fra elementi / zeppe;
- ✓ P.D. ingranamento trasversale / presenza dei diatoni;
- ✓ F.EL. forma degli elementi resistenti;
- ✓ D.EL. dimensione degli elementi resistenti;
- ✓ S.G. sfalsamento dei giunti verticali / ingranamento nel piano della parete;
- ✓ OR. orizzontalità dei filari;
- ✓ RE.EL. resistenza degli elementi.

I possibili giudizi sul rispetto della regola dell’arte per ciascun parametro individuato sono:

R. = parametro rispettato;

P.R. = parametro parzialmente rispettato;

N.R. = parametro non rispettato.



ANALISI DELLA QUALITÀ MURARIA - L'INDICE IQM

Forma degli elementi resistenti (F.EL.)	
NR	Prevalenza di elementi di forma irregolare o arrotondata oppure ciottoli su entrambe le facce della parete.
PR	Compresenza di elementi irregolari o ciottoli e blocchi di forma squadrata o mattoni. Pareti con una faccia di blocchi di forma regolare o mattoni e l'altra faccia di ciottoli od elementi di forma irregolare. Elementi arrotondati o irregolari ma con interstizi riempiti di zeppe ben inserite.
R	Prevalenza di elementi di forma squadrata o sbazzata oppure mattoni o laterizi di forma parallelepipeda su entrambe le facce della parete.

Presenza diatoni / ingranamento trasversale (P.D.)			Orizzontalità dei filari (OR.)	
	Sezione muraria visibile¹	Sezione muraria non visibile (osservazione facce parete ed esecuzione di saggi interni)		
NR	LMT inferiore a 125 cm. Pietre di piccole dimensioni qualunque sia il valore di LMT.	Pietre piccole rispetto allo spessore del muro; assenza di pietre palesemente disposte in senso trasversale alla parete ("di testa").	NR	I tratti orizzontali sono interrotti o con evidenti sfalsamenti sull'intera facciata muraria.
PR	LMT compresa fra 155 cm e 125 cm.	Paramento ben tessuto ed ordinato almeno su una faccia; alcune pietre sono disposte "di testa"; spessore del muro non eccessivo rispetto alle dimensioni delle pietre.	PR	Situazioni intermedie fra il rispetto e il non rispetto, compreso il caso di filari orizzontali solo su una faccia della parete.
R	LMT maggiore di 155 cm	Paramento ben tessuto; blocchi o pietre di dimensione paragonabile a quella dello spessore della parete; presenza sistematica di pietre disposte "di testa".	R	Filari orizzontali su gran parte della parete, senza presentare interruzioni di continuità (per tratti lunghi circa 100 cm) e su entrambe le facce della parete. Murature listate con listature a interasse inferiore a 100 cm.



ANALISI DELLA QUALITÀ MURARIA - L'INDICE IQM

Sfalsamento giunti verticali / Ingranamento nel piano (S.G.)		
	Metodo quantitativo ²	Metodo qualitativo
NR	Parete a paramento unico: $LMT < 140$. Parete a doppio paramento: $LMT < 140$ su una faccia e $LMT < 160$ sull'altra faccia. Parete di soli diatoni di mattoni pieni, qualunque sia il valore di LMT. Parete con pietre di piccole dimensioni qualunque sia il valore di LMT. Evidente assenza d'ingranamento su una o più linee verticali della parete.	Giunti verticali allineati. Giunti allineati verticalmente su due o più elementi in ampie porzioni della parete. Parete di soli diatoni di mattoni pieni, anche con giunti verticali sfalsati. Evidente assenza d'ingranamento su una o più linee verticali della parete.
PR	Parete a paramento unico: LMT fra 140 e 160. Parete a doppio paramento: a) entrambi i paramenti con LMT fra 140 e 160. b) LMT rispettato su una faccia e non rispettato sull'altra faccia. c) LMT rispettato su una faccia e parzialmente rispettato sull'altra faccia.	Giunto verticale in posizione intermedia tra zona centrale dell'elemento inferiore e il suo bordo.
R	Parete a paramento unico: $LMT > 160$ Parete a doppio paramento: $LMT > 160$ su entrambe le facce.	Giunti verticali in corrispondenza della zona centrale dell'elemento inferiore (escluso il caso di parete in mattoni pieni disposti solo a diatoni).

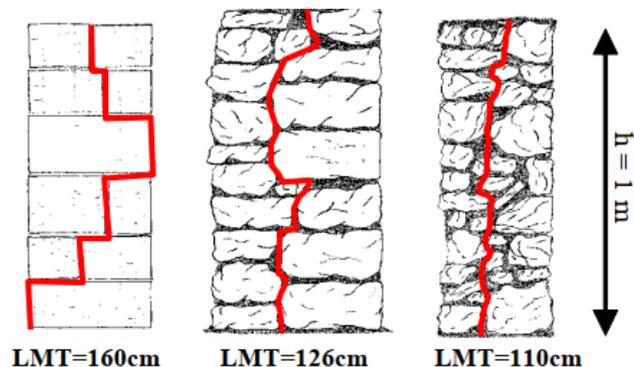


Figura 2. Esempi di linea di minimo tracciato trasversale.

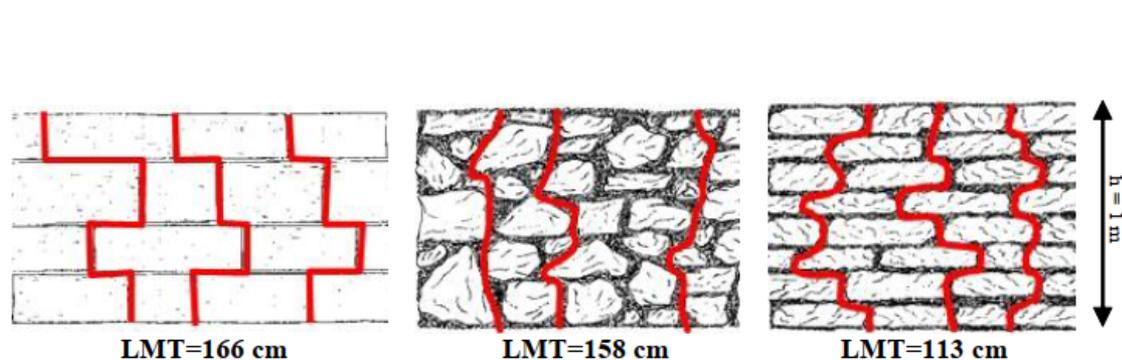


Figura 3. Esempi di linea di minimo tracciato nel piano.



ANALISI DELLA QUALITÀ MURARIA - L'INDICE IQM

Tabella 3. Punteggi da attribuire ai parametri della regola dell'arte per il calcolo di IQM_V , IQM_{FP} e IQM_{NP} .

	Punteggi								
	IQM _V (azioni verticali)			IQM _{FP} (azioni fuori piano)			IQM _{NP} (azioni nel piano)		
	NR	PR	R	NR	PR	R	NR	PR	R
OR Orizzontalità dei filari	0	1	2	0	1	2	0	0.5	1
P.D. Ingranamento trasversale / presenza dei diatoni	0	1	1	0	1.5	3	0	1	2
F.EL. Forma degli elementi resistenti	0	1.5	3	0	1	2	0	1	2
S.G. Sfalsamento dei giunti verticali / ingranamento nel piano	0	0.5	1	0	0.5	1	0	1	2
D.EL. Dimensione degli elementi resistenti	0	0.5	1	0	0.5	1	0	0.5	1
MA Qualità della malta / efficace contatto fra elementi / zeppe	0	0.5	2	0	0.5	1	0	1	2
RE.EL. Resistenza degli elementi	0.3	0.7	1	0.5	0.7	1	0.3	0.7	1

Tabella 5. Attribuzione delle categorie murarie in base ai valori di IQM.

Direzione azione	Categoria della muratura		
	A	B	C
IQM _V (azioni verticali)	$5 \leq IQM_V \leq 10$	$2,5 \leq IQM_V < 5$	$0 \leq IQM_V < 2,5$
IQM _{FP} (azioni ortogonali)	$7 \leq IQM_{FP} \leq 10$	$4 < IQM_{FP} < 7$	$0 \leq IQM_{FP} \leq 4$
IQM _{NP} (azioni complanari)	$5 < IQM_{NP} \leq 10$	$3 < IQM_{NP} \leq 5$	$0 \leq IQM_{NP} \leq 3$

Murature NON in mattoni pieni o in blocchi:

$$IQM_V = m \times RE.EL.V \times (OR_V + P.D.V + F.EL.V + S.G.V + D.EL.V + MA_V)$$

$$IQM_{FP} = m \times RE.EL.FP \times (OR_{FP} + P.D.FP + F.EL.FP + S.G.FP + D.EL.FP + MA_{FP})$$

$$IQM_{NP} = m \times RE.EL.NP \times (OR_{NP} + P.D.NP + F.EL.NP + S.G.NP + D.EL.NP + MA_{NP})$$

Murature in mattoni pieni o blocchi:

$$IQM_V = m \times g \times r_V \times RE.EL.V \times (OR_V + P.D.V + F.EL.V + S.G.V + D.EL.V + MA_V)$$

$$IQM_{FP} = m \times g \times r_{FP} \times RE.EL.FP \times (OR_{FP} + P.D.FP + F.EL.FP + S.G.FP + D.EL.FP + MA_{FP})$$

$$IQM_{NP} = m \times g \times r_{NP} \times RE.EL.NP \times (OR_{NP} + P.D.NP + F.EL.NP + S.G.NP + D.EL.NP + MA_{NP})$$



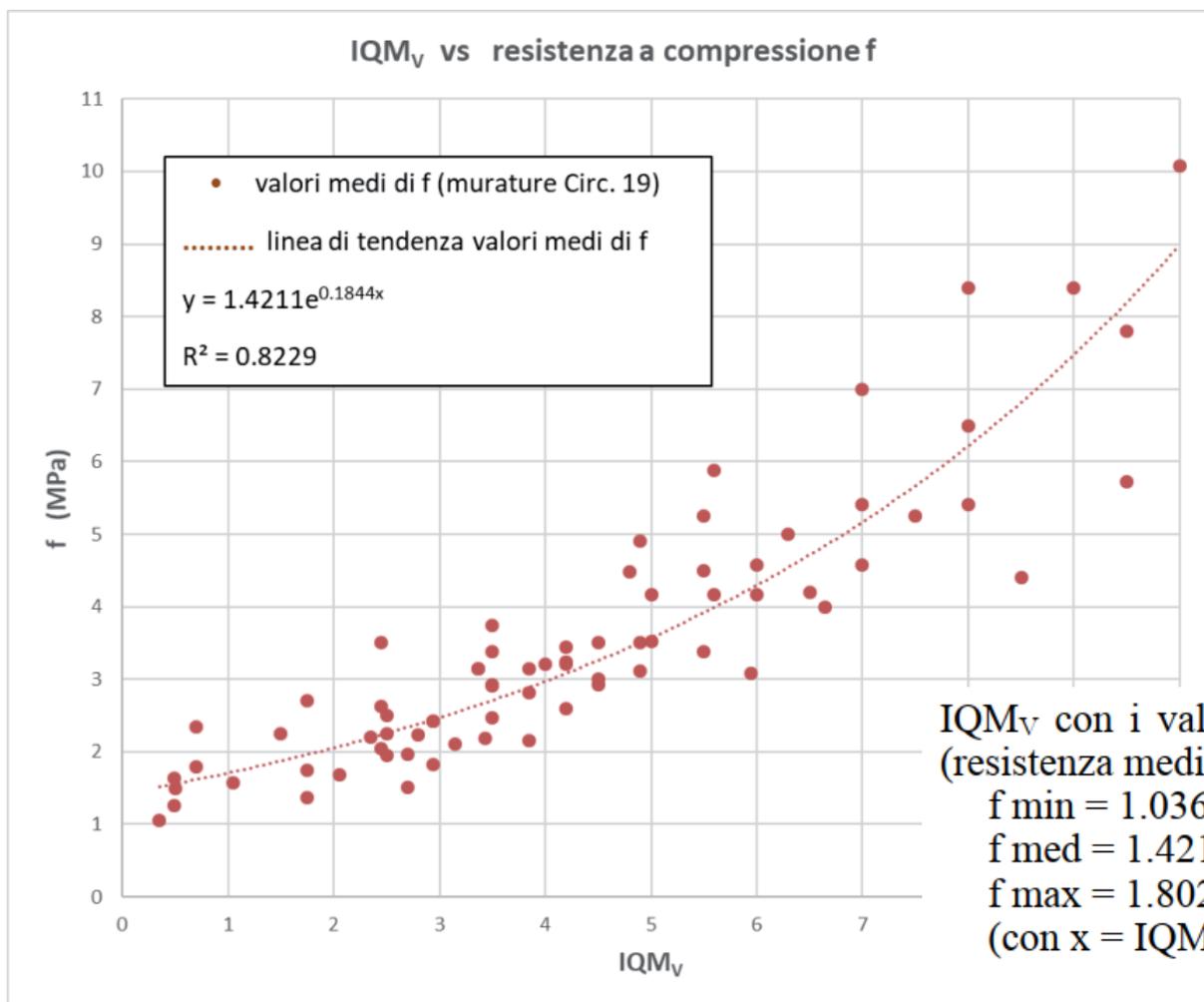
ANALISI DELLA QUALITÀ MURARIA - L'INDICE IQM

Attraverso un'attenta campagna sperimentale è stato quindi possibile mettere in relazione i diversi IQM (in particolare IQMV e IQMNP) con i parametri meccanici delle tipologie murarie presenti nella Circolare delle NTC2018, considerando le seguenti correlazioni:

- IQMV con f
- IQMNP con τ_0
- IQMNP con fV_0
- IQMNP con G
- IQMV con E .

Ogni correlazione è analizzata nei confronti del valore minimo, medio e massimo del parametro meccanico considerato, rappresentandola su un diagramma cartesiano avente in ascissa il valore dell'IQM (verticale o nel piano) della muratura in esame, e in ordinata il parametro meccanico considerato (f , τ_0 , fV_0 , G o E ; valori minimo, medio o massimo, a seconda del grafico) per la stessa muratura.

ANALISI DELLA QUALITÀ MURARIA - L'INDICE IQM



IQM_V con i valori minimi, medi e massimi di f
(resistenza media a compressione)

$f_{\min} = 1.036e^{0.1961x}$

$R^2 = 0.8034$

$f_{\text{med}} = 1.4211e^{0.1844x}$

$R^2 = 0.8229$

$f_{\max} = 1.8021e^{0.1775x}$

$R^2 = 0.8244$

(con $x = \text{IQM}_V$)

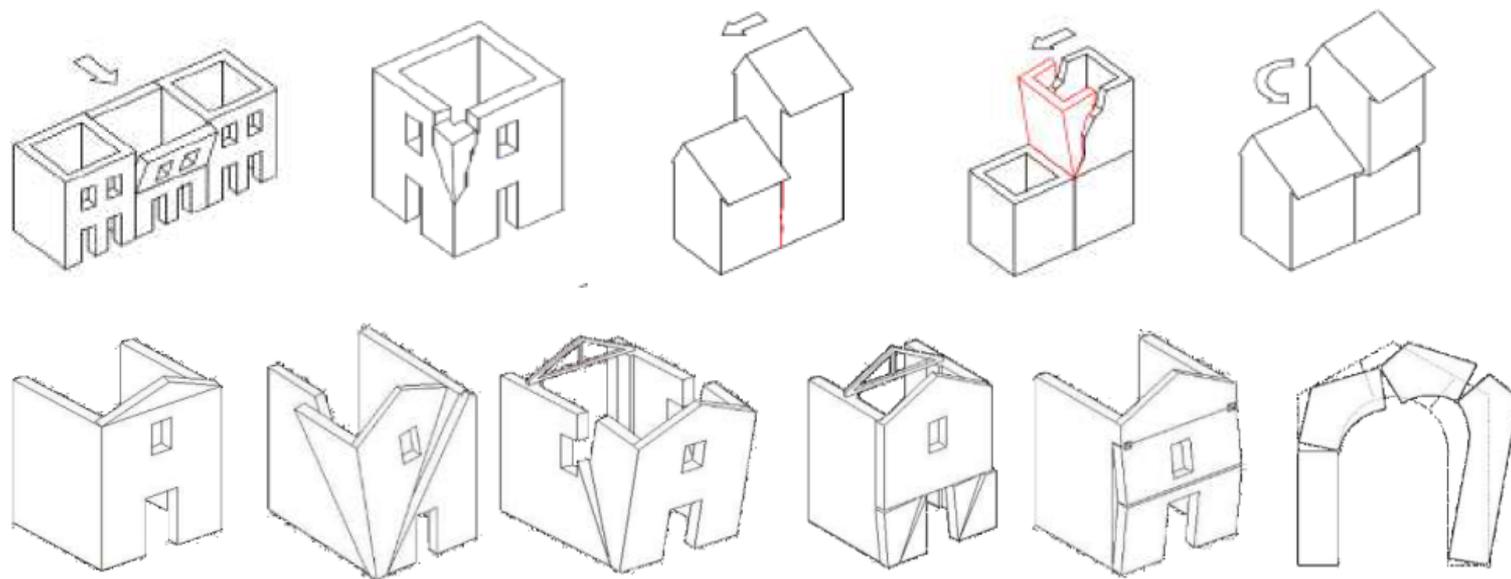
Figura 5. Curve di correlazione fra il valore medio di f (secondo le tabelle della Circolare 2019) e IQM_V.



ANALISI E VERIFICHE LOCALI (MECCANISMI DI COLLASSO)

MACROELEMENTO: parte costruttivamente riconoscibile del manufatto, di caratteristiche omogenee in riferimento al comportamento strutturale. Può coincidere con una porzione identificabile anche sotto l'aspetto architettonico e funzionale.

Le fasce d'influenza di un macroelemento sono individuate da connessioni carenti o mancanti o da effetti di danneggiamento (lesioni).

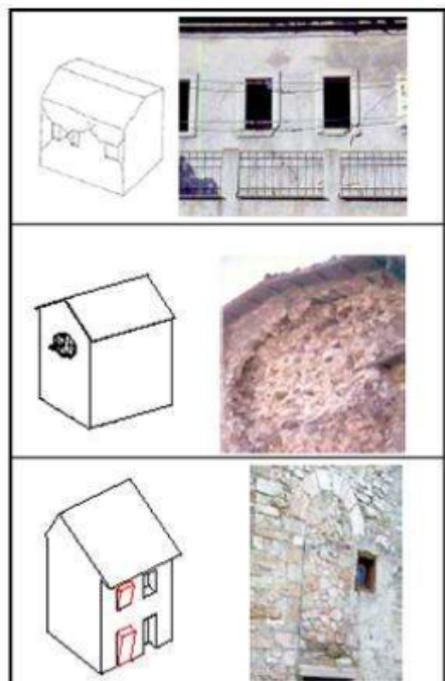




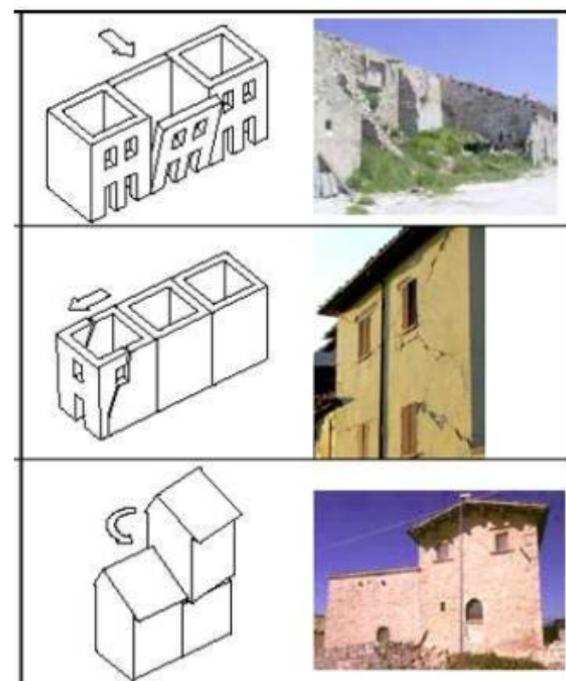
ANALISI E VERIFICHE LOCALI (MECCANISMI DI COLLASSO)

Le verifiche possono essere svolte tramite l'analisi limite dell'equilibrio secondo l'approccio cinematico (teorema dei lavori virtuali) descritto nel §C8.7.1.2 della Circolare Applicativa delle NTC2018. L'applicazione del metodo presuppone l'analisi di meccanismi locali ritenuti significativi per la costruzione, che possono essere:

- a) ipotizzati sulla base della conoscenza del comportamento sismico di strutture analoghe, già danneggiate dal terremoto (abachi distinti per le varie tipologie costruttive: edifici isolati, schiere di edifici, chiese...)
- b) individuati considerando la presenza di eventuali stati fessurativi, anche di natura non sismica



Meccanismi locali



Aggregati edilizi

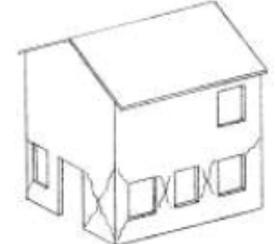
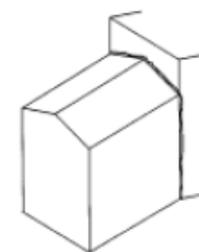
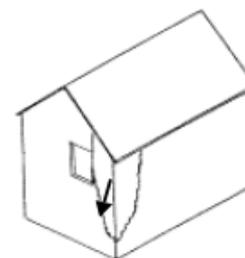
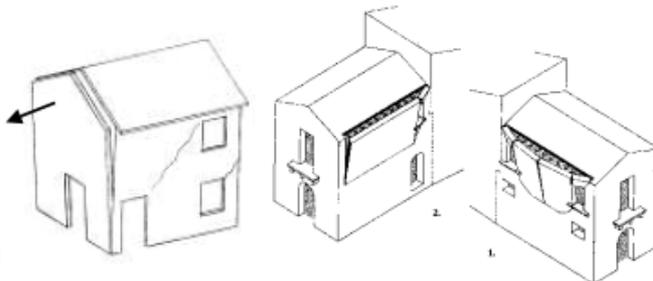
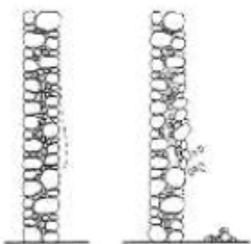


OSSERVAZIONE DEI DANNI SUGLI EDIFICI

- Scarso collegamento tra i paramenti murari
- Collegamento inadeguato tra muri e tra muri e solai
- Inefficienti collegamento tra i muri d'ambito e tra questi e i solai; presenza di aperture in vicinanza degli spigoli
- Scadente collegamento tra corpi a contatto
- Scarsa qualità della muratura e presenza di aperture e discontinuità

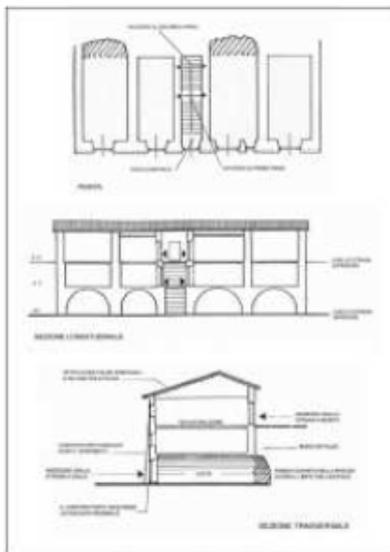


- Espulsione del paramento esterno
- Ribaltamento globale della facciata o di porzioni di edificio
- Crollo dell'angolata
- Lesioni in corrispondenza dell'attacco degli edifici
- Collasso a taglio delle pareti- rotazione e ribaltamento nel piano





- Analisi storico tipologica
- Evidenziazione delle vulnerabilità comuni
- Redazione dell' abaco dei meccanismi di danno



MURATURE	
1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 1.1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 1.2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE	1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 1.1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 1.2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE

MURATURE	
2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 2.1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 2.2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE	2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 2.1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 2.2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE

MURATURE	
3. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 3.1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 3.2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE	3. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 3.1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 3.2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE

MURATURE	
4. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 4.1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 4.2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE	4. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 4.1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 4.2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE

MURATURE	
5. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 5.1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 5.2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE	5. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 5.1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 5.2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE

MURATURE	
6. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 6.1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 6.2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE	6. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 6.1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 6.2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE

MURATURE	
7. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 7.1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 7.2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE	7. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 7.1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 7.2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE

MURATURE	
8. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 8.1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 8.2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE	8. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 8.1. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE 8.2. MURATURE TRADIZIONALI DELLA PIADE



ABACHI DI MECCANISMI DI DANNO: CHIESE



Santa Gemma, Goriano Sicoli (AQ)



San Biagio D'Amiterno, L'Aquila

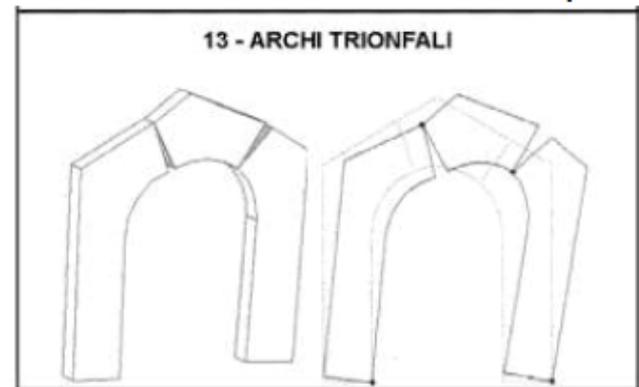




ABACHI DI MECCANISMI DI DANNO: CHIESE

San Marciano e
Nicandro, L'Aquila

Santa Margherita
(dei Gesuiti),
L'Aquila





MODELLAZIONE E METODI DI ANALISI GLOBALI

1. ANALISI E VERIFICA INSTABILITA' LOCALE DELLA MURATURA
2. ANALISI E VERIFICHE LOCALI (MECCANISMI DI COLLASSO)
3. MODELLAZIONE E METODI DI ANALISI GLOBALI

Il **metodo di analisi globale** prevede l'adozione di un **modello meccanico** della struttura in grado di descriverne con accuratezza la **risposta sotto azione dinamica** (distribuzione di massa e di rigidezza effettiva). La rigidezza degli elementi può essere riferita a condizioni fessurate.

Scelta di un metodo di analisi adeguato alle caratteristiche della struttura:

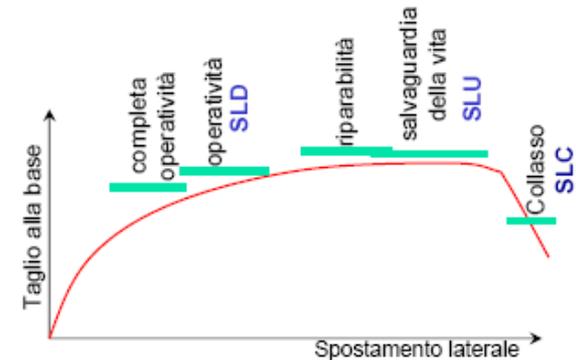
- ✓ statica lineare
- ✓ dinamica modale
- ✓ statica non lineare
- ✓ dinamica non lineare

ANALISI STATICA NON LINEARE

L'analisi statica non-lineare (punto 7.3.4.1 NTC2018) risulta essere il **metodo di analisi più adatto nell'analisi di edifici in muratura**, e quindi per costruzioni esistenti.

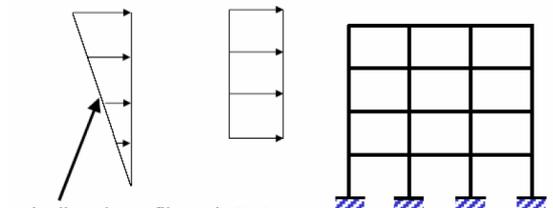
L'analisi non lineare statica consiste nell'applicare alla struttura i carichi gravitazionali e, per la direzione considerata dell'azione sismica, un sistema di forze orizzontali distribuite, ad ogni livello della costruzione, proporzionalmente alle forze d'inerzia ed aventi risultante F_b (taglio alla base).

Tali forze sono scalate in modo da far crescere **monotonamente**, fino al raggiungimento delle condizioni di collasso locale o globale, **lo spostamento orizzontale d_c di un punto di controllo coincidente con il centro di massa dell'ultimo livello della costruzione**. Il diagramma F_b-d_c rappresenta la **curva di capacità della struttura**.



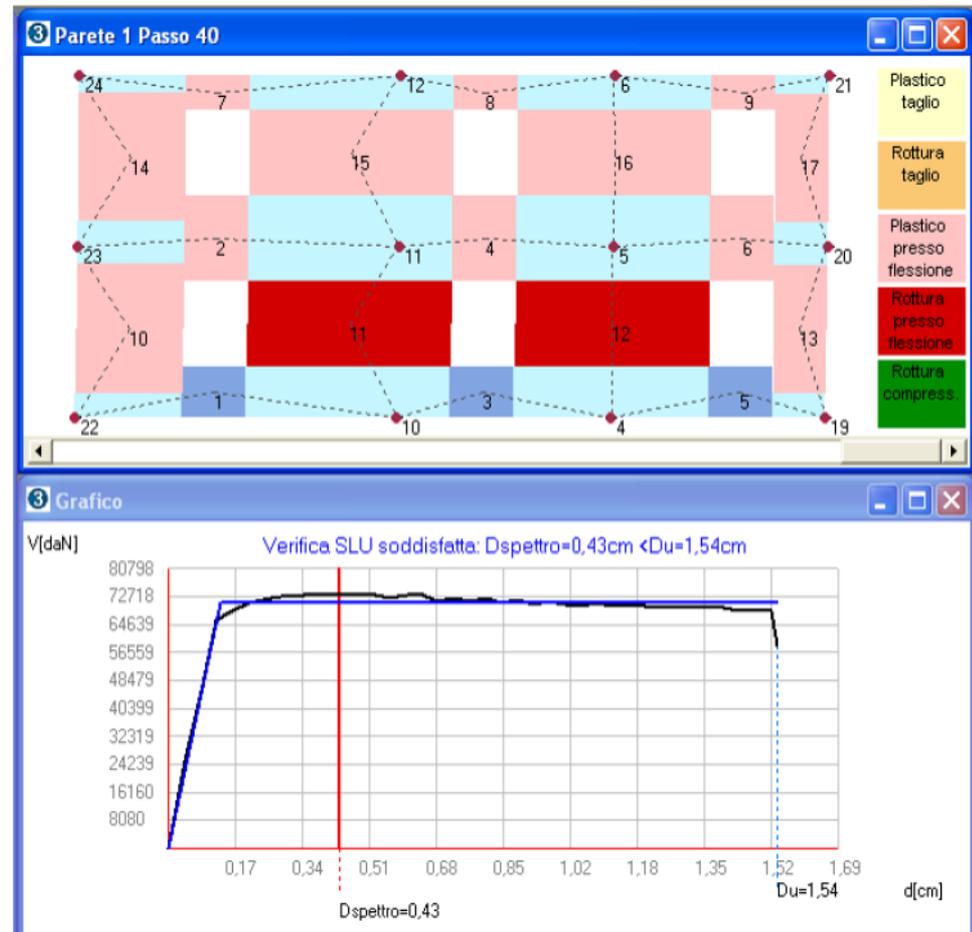
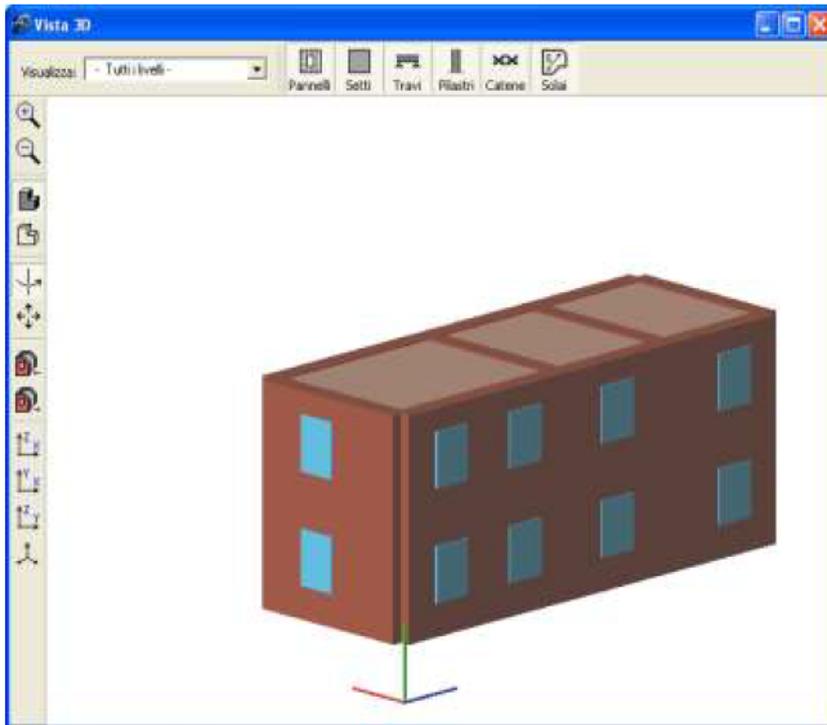
Enfatizza le richieste inelastiche ai piani bassi ed il taglio

$$F_i = m_i \Phi_i^1 \quad F_i = m_i$$



simile al profilo adottato nell'analisi statica lineare

ANALISI STATICA NON LINEARE





CRITERI E TECNICHE D'INTERVENTO

Interventi volti a ridurre le carenze dei collegamenti

Interventi sugli archi e sulle volte

Interventi volti a ridurre l'eccessiva deformabilità dei solai

Interventi in copertura

Interventi che modificano la distribuzione degli elementi verticali resistenti

Interventi volti ad incrementare la resistenza nei maschi murari

Interventi su pilastri e colonne

Interventi volti a rinforzare le pareti intorno alle aperture

Interventi alle scale

Interventi volti ad assicurare i collegamenti degli elementi non strutturali

Interventi in fondazione

Realizzazione di giunti sismici



CRITERI E TECNICHE D'INTERVENTO

Nella scelta degli interventi deve essere posta particolare attenzione ai **principi della conservazione**.

Inoltre, la valutazione della sicurezza e una chiara comprensione della struttura devono essere alla base delle decisioni e delle scelte degli interventi.

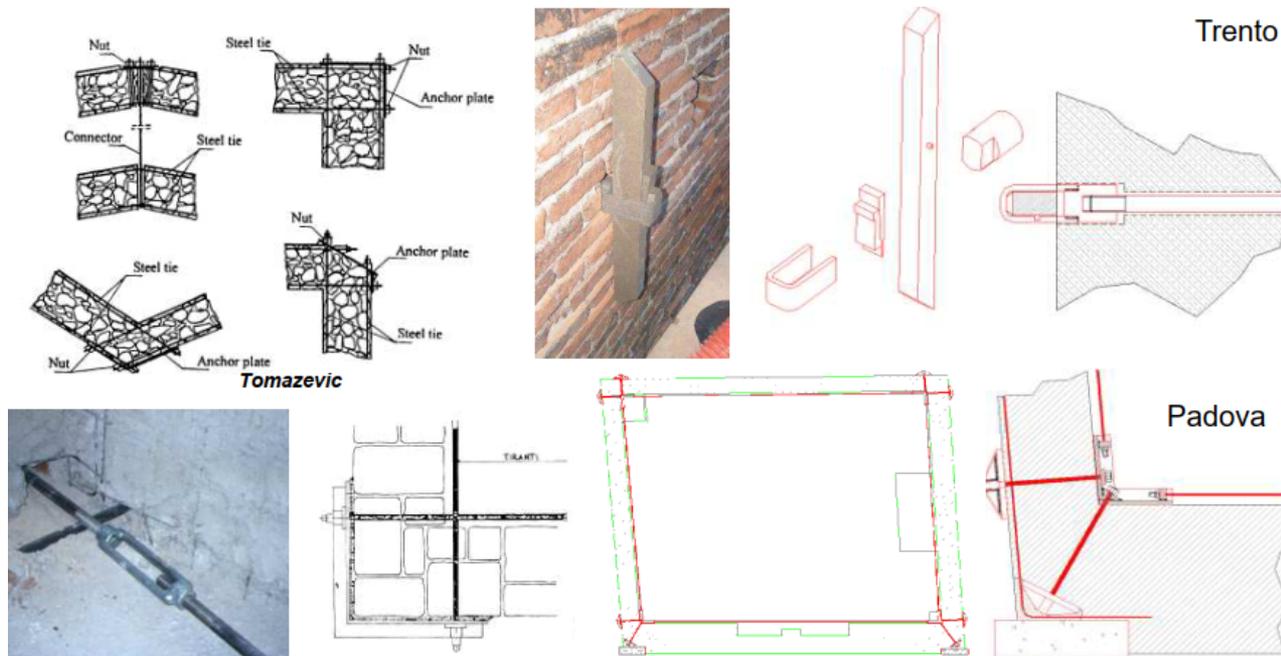
Pertanto, l'intervento non deve essere finalizzato solo al raggiungimento di un appropriato livello di sicurezza della costruzione, ma deve garantire anche (**miglioramento controllato**):

- ✓ compatibilità e durabilità;
- ✓ integrazione e non trasformazione della struttura;
- ✓ rispetto di concezione e tecniche originarie della struttura;
- ✓ bassa invasività;
- ✓ se possibile, reversibilità o rimovibilità;
- ✓ minimizzazione dell'intervento.



CRITERI E TECNICHE D'INTERVENTO: TIRANTI

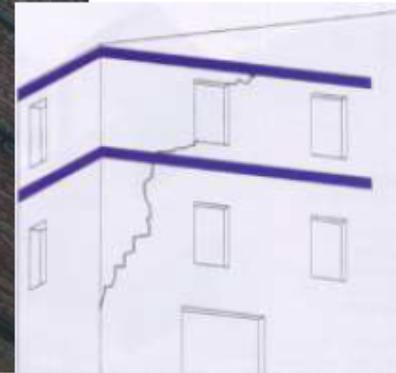
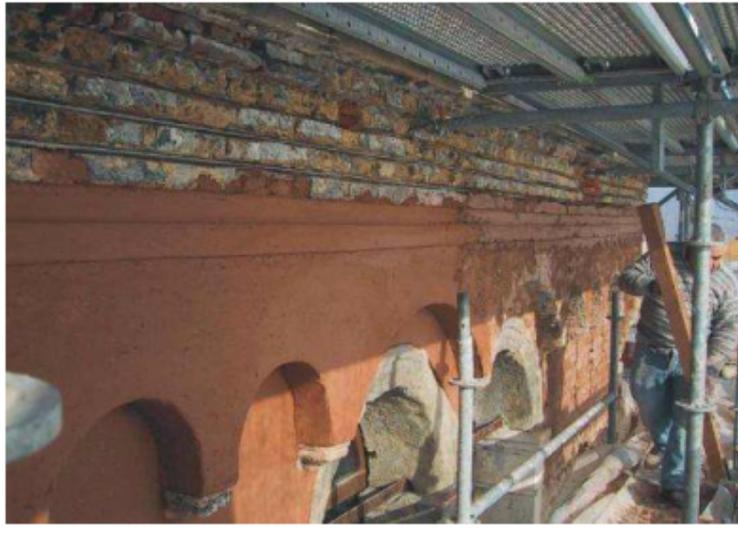
Disposti nelle due direzioni principali del fabbricato, a livello dei solai ed in corrispondenza delle pareti portanti, ancorati alle murature mediante capochiave (a paletto o a piastra), possono favorire il comportamento d'insieme del fabbricato. Migliorano il comportamento nel piano di pareti forate. Per i capochiave sono consigliati paletti semplici; è in genere necessario un consolidamento locale della muratura nella zona di ancoraggio.





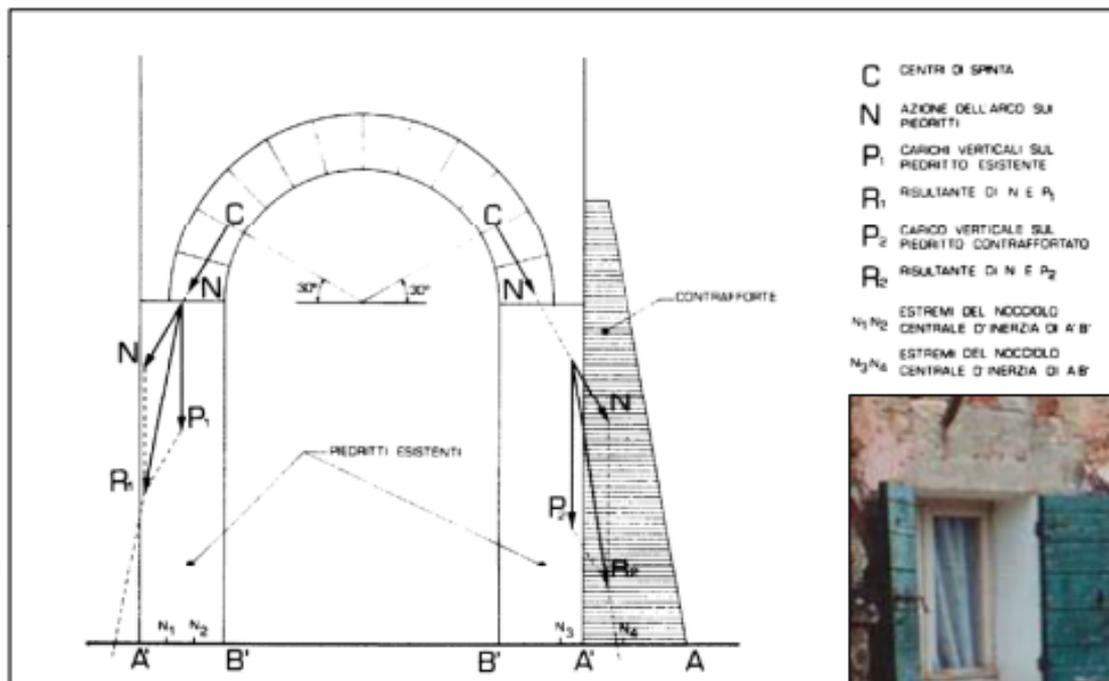
CRITERI E TECNICHE D'INTERVENTO: CERCHIATURE

Realizzate con elementi metallici o materiali compositi. E' necessario evitare l'insorgere di concentrazioni di tensioni in corrispondenza degli spigoli delle murature.





CRITERI E TECNICHE D'INTERVENTO: ARCHI E VOLTE



→ CONTENIMENTO DELLE
SPINTE DI ARCHI E VOLTE

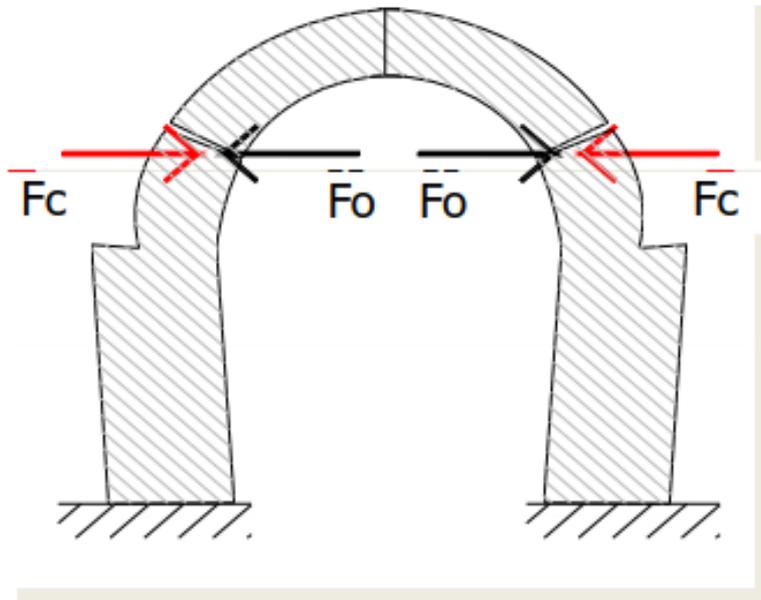
→ RINFORZO CORONA
(meno frequente)

Sezione di base e Altezza tali da contenere il puntone.

NB. il contrafforte deve essere vincolato alla muratura per trasferire il carico verticale e orizzontale.



CRITERI E TECNICHE D'INTERVENTO: ARCHI E VOLTE



Dimensionamento della sezione: si affida alla catena l'intera spinta orizzontale ($F_c = F_o$).

È prudente non far lavorare l'acciaio oltre i 100 MPa (1000 kg/cm²).

Tesatura iniziale: la forza di tesatura deve essere inferiore a F_c . In assenza di carico variabile si avrebbe infatti $F_c > F_o$ e si potrebbe indurre il sollevamento dell'arco.

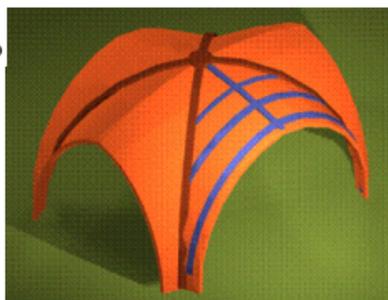
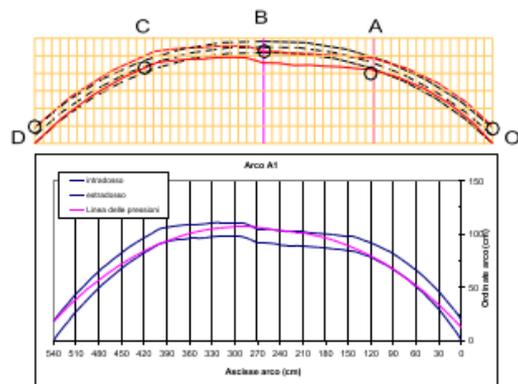


CRITERI E TECNICHE D'INTERVENTO: ARCHI E VOLTE

E' possibile il ricorso a tecniche di placcaggio all'estradosso con fasce di materiale composito FRP. Il placcaggio all'intradosso con materiali compositi è efficace se associato alla realizzazione di un sottarco, in grado di evitare le spinte a vuoto. La realizzazione di controvolte in calcestruzzo o simili, armate o no, è da evitarsi.

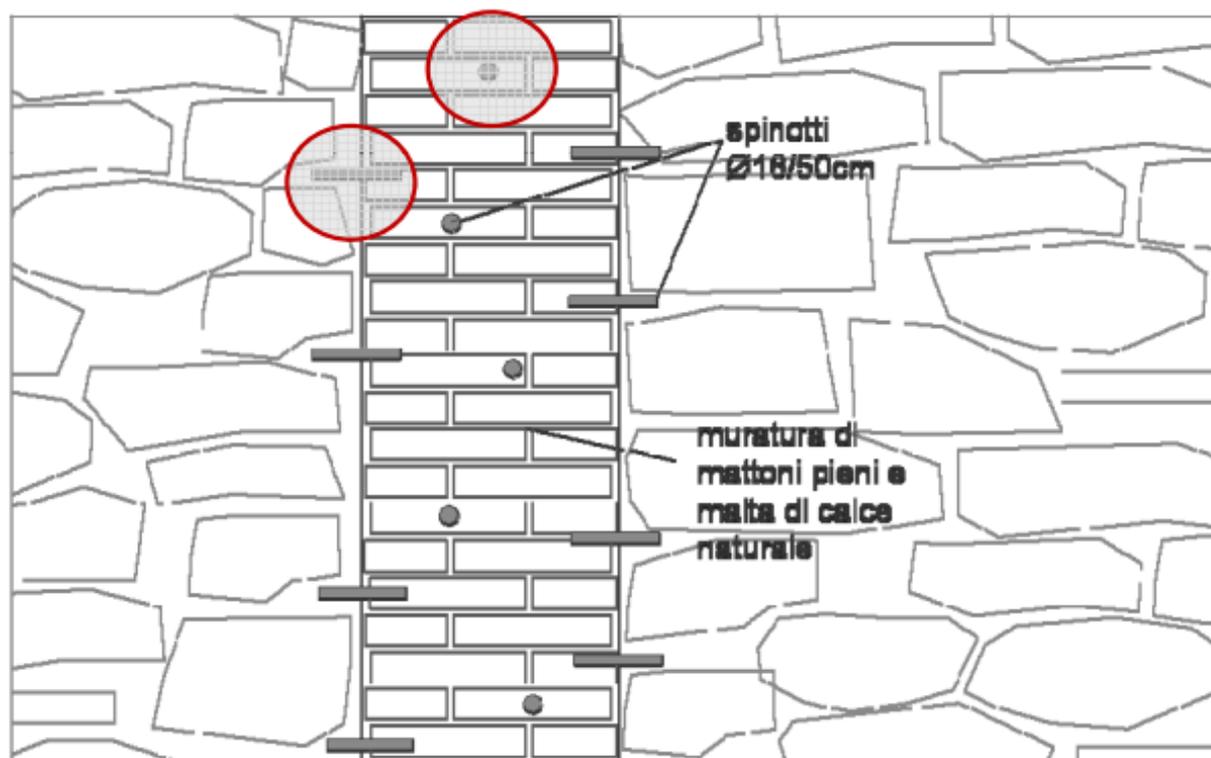


Verona, San Fermo



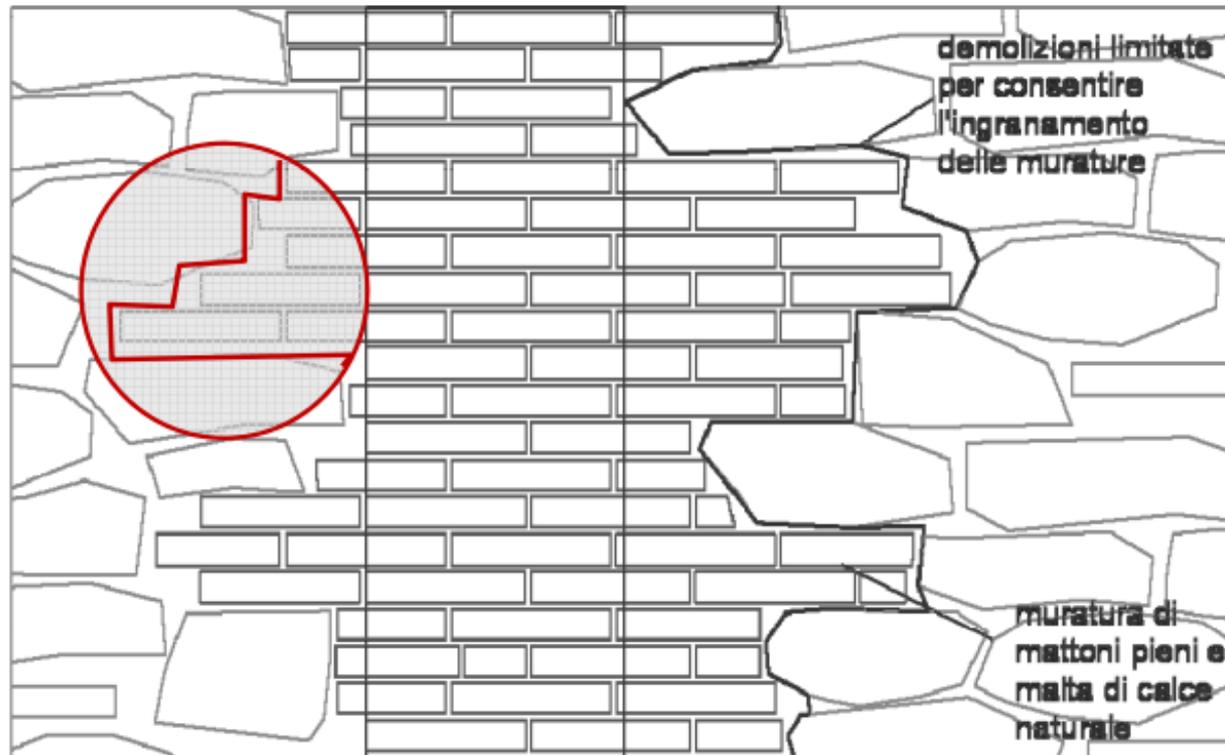
CRITERI E TECNICHE D'INTERVENTO: DISTRIBUZIONE ELEMENTI VERTICALI RESISTENTI

Riempimento con mattoni pieni e spinotti sul contorno



- NB: → Garantire efficace collegamento con spinotti
→ Garantire uniformità rigidzze

CRITERI E TECNICHE D'INTERVENTO: DISTRIBUZIONE ELEMENTI VERTICALI RESISTENTI



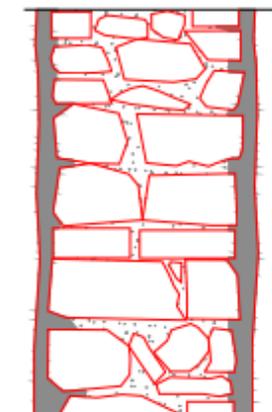
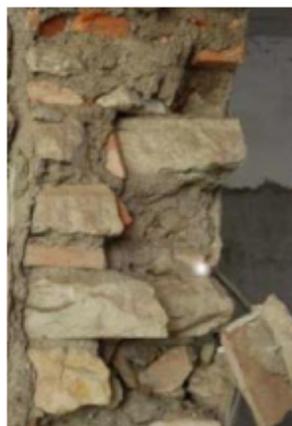
- NB: → Garantire efficace ingranamento tra murature vecchie e nuove
→ Garantire uniformità rigidità



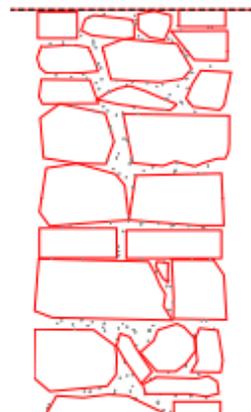
CRITERI E TECNICHE D'INTERVENTO: INTONACO ARMATO

MURATURE ANTICHE → MALTA DI CALCE + RETE FIBRE DI VETRO

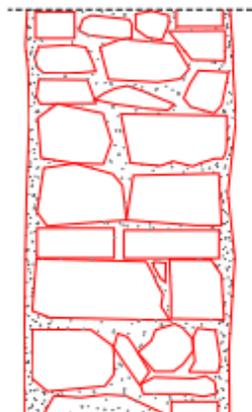
Rimozione intonaco cementizio e formazione intonaco armato con rete in fibra di vetro



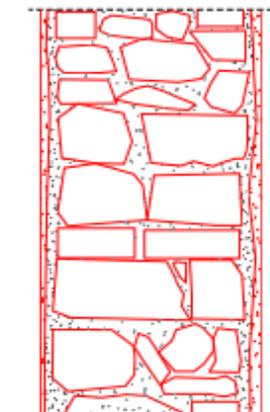
Rimozione intonaco cementizio



Formazione nuovo strato di intonaco in malta di calce idraulica naturale armato con rete da intonaco (s = 3-4cm)



Formazione strato di intonaco di finitura in malta di calce (1.5-2cm)



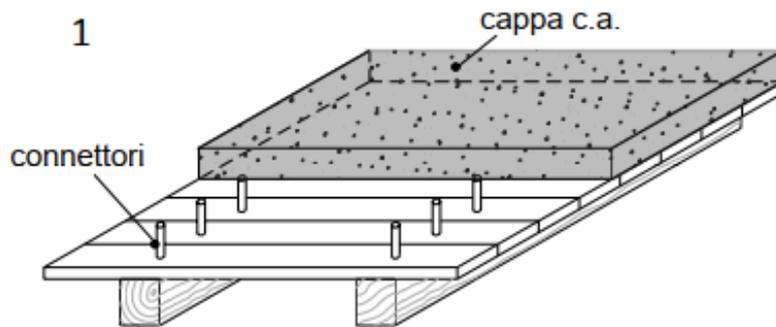
NB: Intonaco di malta di calce + rete in fibre di vetro o rete da intonaco,

NON si usa la rete elettrosaldata

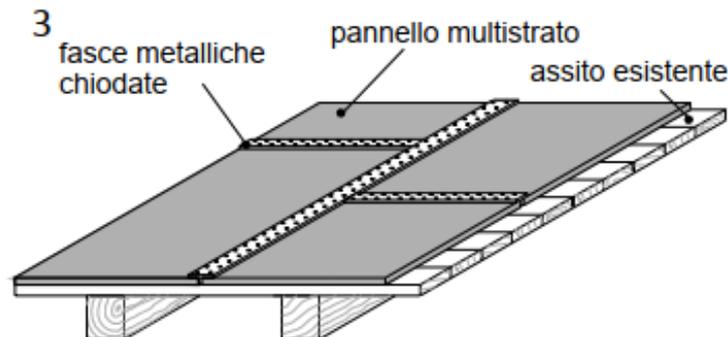
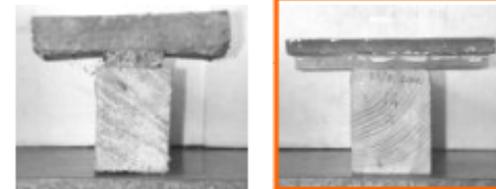


CRITERI E TECNICHE D'INTERVENTO: DIAFRAMMI DI PIANO

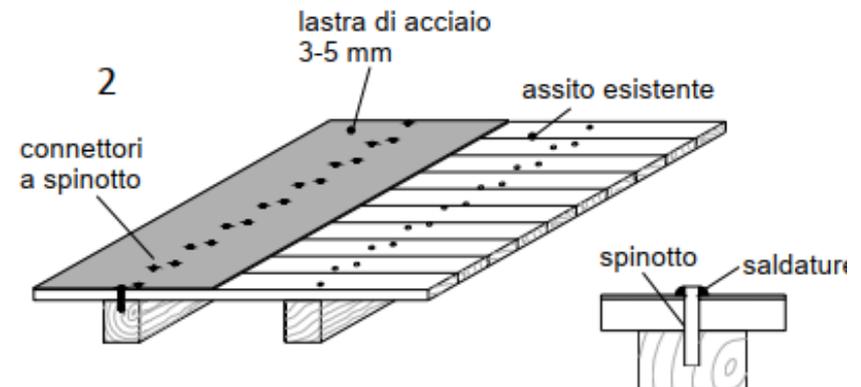
progressivamente si riduce l'effetto irrigidente rispetto ai carichi verticali (1-2-3), ci si muove verso un intervento di solo miglioramento sismico



Lastra sottile in c.a. ordinario oppure ad alte prestazioni



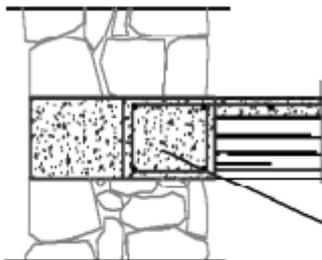
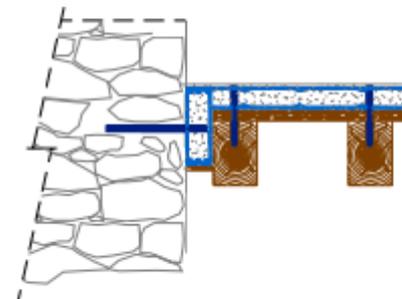
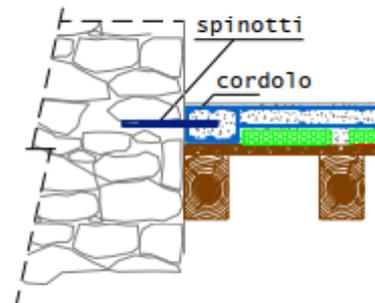
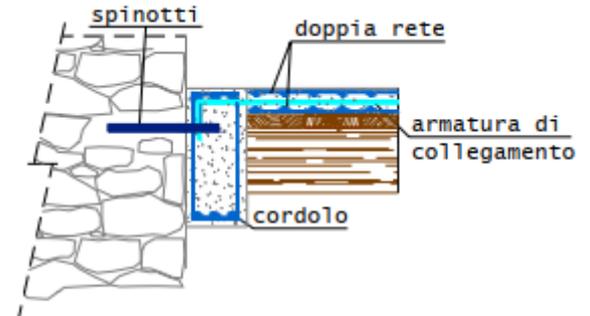
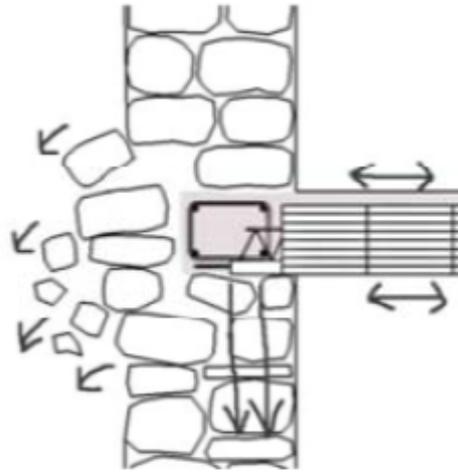
Diaframma in pannelli di legno multistrato



Diaframma in sottili lastre di acciaio



CRITERI E TECNICHE D'INTERVENTO: DIAFRAMMI DI PIANO



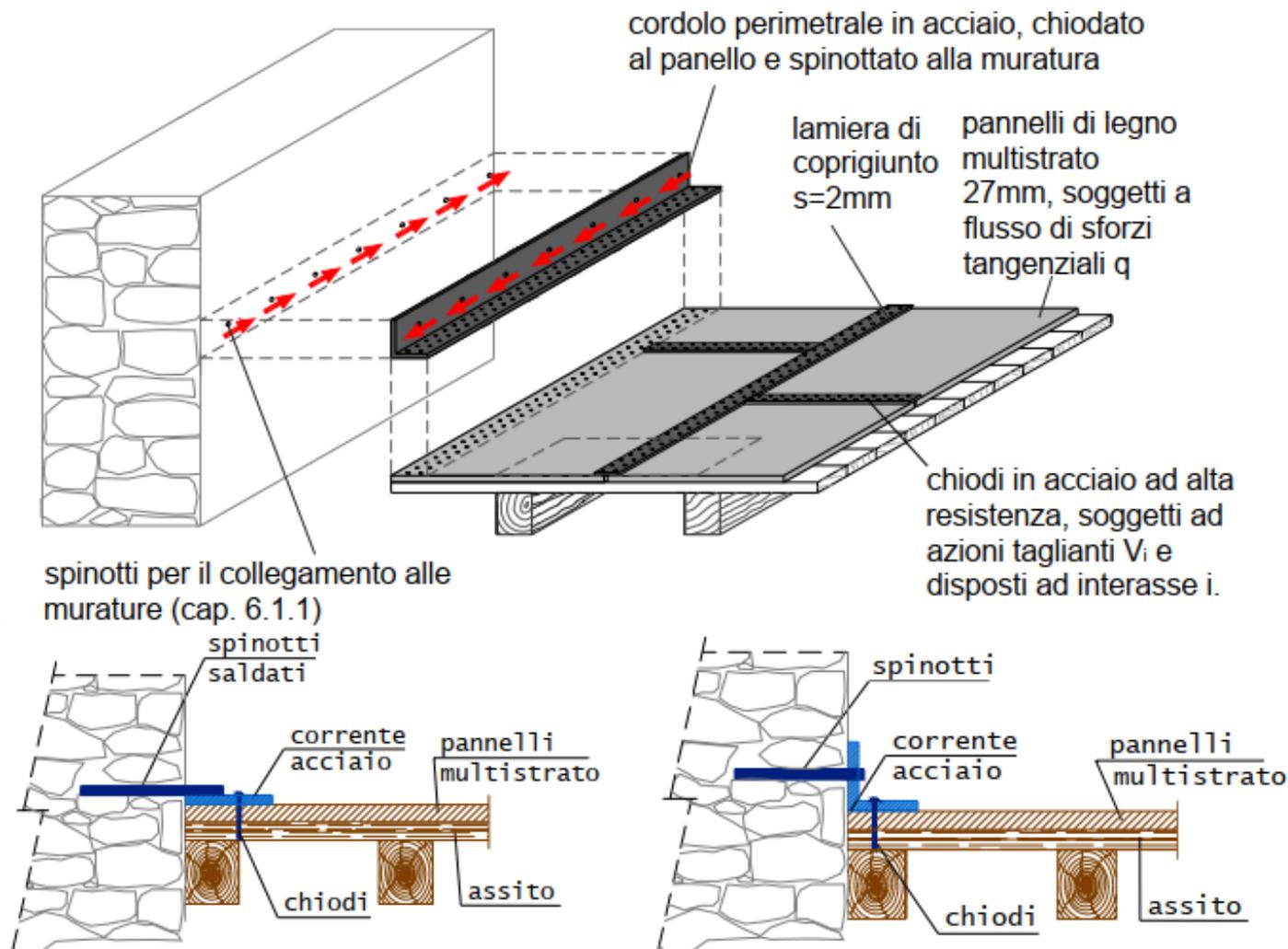
EVITARE
cordoli
perimetrale
realizzato entro
lo spessore
della muratura



EVITARE
connessioni
a code di
rondine



CRITERI E TECNICHE D'INTERVENTO: DIAFRAMMI DI PIANO





CATEGORIE DI INTERVENTO

ADEGUAMENTO

Interventi atti a conseguire i livelli di sicurezza previsti dalle presenti norme

MIGLIORAMENTO

Interventi di miglioramento atti ad aumentare la sicurezza strutturale esistente, pur senza necessariamente raggiungere i livelli richiesti dalle presenti norme.

ALTRI INTERVENTI

Riparazioni o interventi locali che interessino elementi isolati, e che comunque comportino un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti.

- ✓ Gli interventi di adeguamento e miglioramento devono essere sottoposti a collaudo statico.
- ✓ Per i beni di interesse culturale in zone dichiarate a rischio sismico, ai sensi del comma 4 dell'art. 29 del D. lgs. 22 gennaio 2004, n. 42 "*Codice dei beni culturali e del paesaggio*", è in ogni caso possibile limitarsi ad interventi di miglioramento effettuando la relativa valutazione della sicurezza."



CATEGORIE DI INTERVENTO

INTERVENTI DI ADEGUAMENTO (NTC2018)

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

- a) sopraelevare la costruzione;
- b) ampliare la costruzione mediante opere ad essa 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%, valutati secondo la combinazione caratteristica di cui alla equazione 2.5.2 del § 2.5.3, includendo i soli carichi gravitazionali. Resta comunque fermo l'obbligo di procedere alla verifica locale delle singole parti e/o elementi della struttura, anche se interessano porzioni limitate della costruzione;
- d) effettuare interventi strutturali volti a trasformare la costruzione mediante un insieme sistematico di opere che portino ad un sistema strutturale diverso dal precedente; nel caso degli edifici, effettuare interventi strutturali che trasformano il sistema strutturale mediante l'impiego di nuovi elementi verticali portanti su cui grava almeno il 50% dei carichi gravitazionali complessivi riferiti ai singoli piani.
- e) apportare modifiche di classe d'uso che conducano a costruzioni di classe III ad uso scolastico o di classe IV.



CATEGORIE DI INTERVENTO

INTERVENTI DI ADEGUAMENTO (NTC2018)

Nei casi a), b) e d), per la verifica della struttura, si deve avere $\xi_E \geq 1,0$.

Nei casi c) ed e) si può assumere $\xi_E \geq 0,80$.

Resta comunque fermo l'obbligo di procedere alla verifica locale delle singole parti e/o elementi della struttura, anche se interessano porzioni limitate della costruzione.

Una variazione dell'altezza dell'edificio dovuta alla realizzazione di cordoli sommitali o a variazioni della copertura che non comportino incrementi di superficie abitabile, non è considerato ampliamento, ai sensi della condizione a). In tal caso non è necessario procedere all'adeguamento, salvo che non ricorrano una o più delle condizioni di cui agli altri precedenti punti.

In merito all'ultimo capoverso del § 8.4.3 delle NTC, esso stabilisce che non è necessario procedere all'adeguamento, salvo che non ricorrano una o più delle condizioni b), c), d) od e) di cui allo stesso §8.4.3, solo nel caso di "variazione dell'altezza dell'edificio" causata dalla realizzazione di cordoli sommitali oppure causata da variazioni della copertura, che non comportino incrementi di superficie abitabile significativi dal punto di vista strutturale. Infatti, la ratio di tale disposizione è di permettere nelle situazioni citate, ferme restando le norme urbanistiche ed i regolamenti edilizi locali, la realizzazione di interventi di possibile beneficio strutturale, senza dover necessariamente adeguare l'intera costruzione.



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Trento



GRAZIE DELL'ATTENZIONE

Sala di Rappresentanza del Consiglio Regionale del Trentino Alto-Adige

Piazza Dante 16

martedì 14 maggio 2024