

STRUTTURE ESISTENTI IN MURATURA: PERCORSO DELLA CONOSCENZA

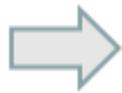
Prof. Ing. Flora Faleschini
Dipartimento Ingegneria
Civile, Edile e Ambientale
VMSSE 2023/2024



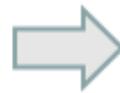
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

APPROCCIO ALLE STRUTTURE ESISTENTI

STRUTTURA
NUOVA



- Dimensionamento
- Dettagli Costruttivi

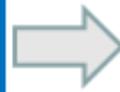
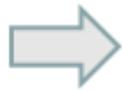


Verifica di
sicurezza SL



Adeguate Livello
di Sicurezza

STRUTTURA
ESISTENTE



Verifica di
sicurezza SL



Adeguate Livello
di Sicurezza



Inadeguate Livello
di Sicurezza

Dettagli costruttivi
NON
SODDISFACENTI

DIAGNOSI

La comprensione di un fenomeno di dissesto o degrado strutturale passa attraverso la fase della diagnosi, passo fondamentale e necessario per **identificare** correttamente la situazione di pericolosità, e per poter **progettare** adeguatamente un intervento di ripristino.

Con diagnosi si intendono tutti i processi legati **all'analisi e identificazione delle cause** che hanno promosso la situazione di degrado/alterazione/danno/dissesto/collasso nella struttura analizzata o in parti di essa.

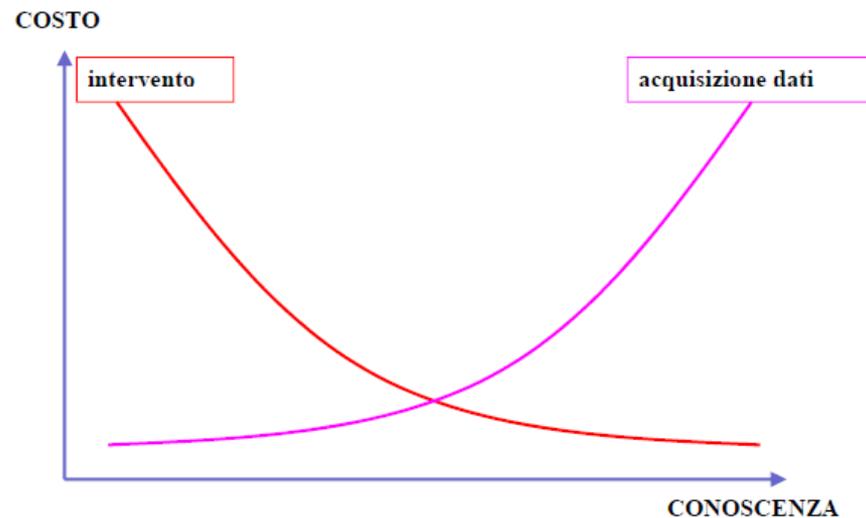
Al fine di risalire a tali cause, il tecnico può avvalersi di diversi strumenti e **tecniche di indagine**, oltre al classico **sopralluogo visivo**, il quale da solo, a volte, non è sufficiente.

Gli **obiettivi** della diagnosi sono:

- Determinare le caratteristiche **chimico-fisiche** dei materiale;
- Misurarne le prestazioni **meccaniche** ed **elastiche residue**;
- Valutare se e quali fenomeni di **degrado** siano attivi.

DIAGNOSI

Inoltre, la scelta delle tecniche diagnostiche dipende dal **livello di conoscenza** richiesto.

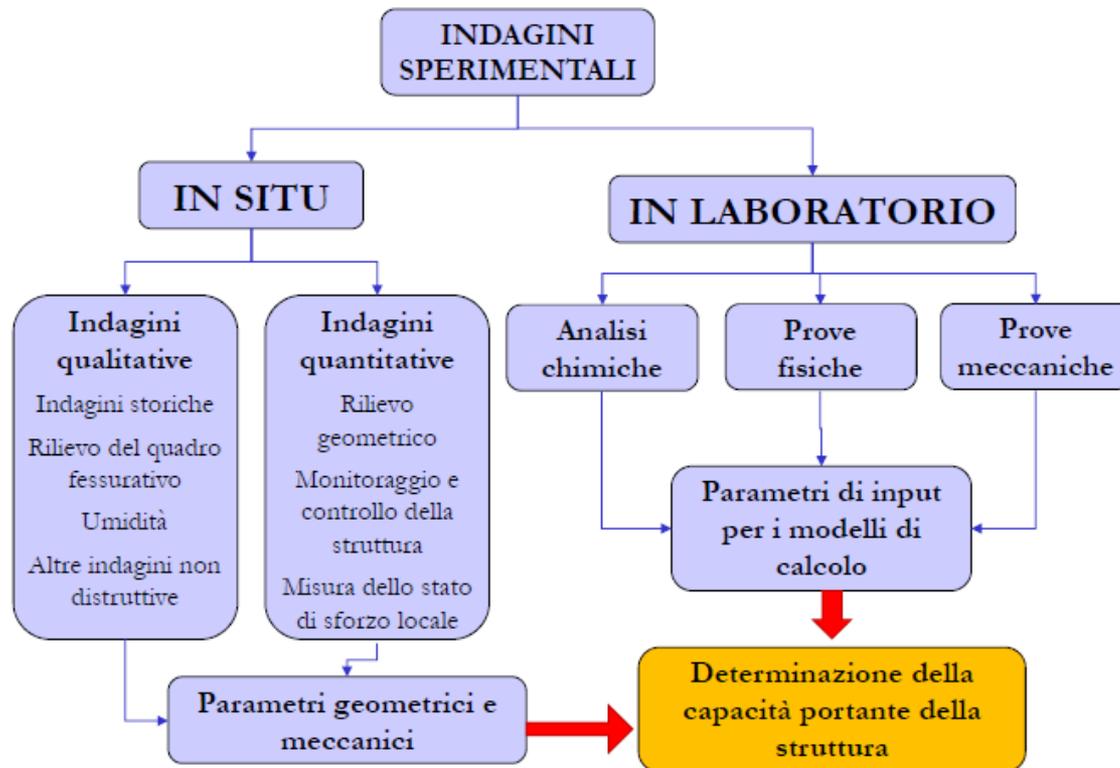


Il livello di conoscenza determina:

- Metodo di indagine;
- Valori dei **fattori di confidenza** da applicare alle proprietà dei materiali.

DIAGNOSI

In generale, per qualsiasi struttura, il seguente iter è sempre valido:



STRUTTURE IN MURATURA: RILIEVO

La valutazione della sicurezza delle costruzioni in muratura deve essere effettuata nei confronti dei meccanismi di collasso, **sia locali, sia globali** (se significativi).

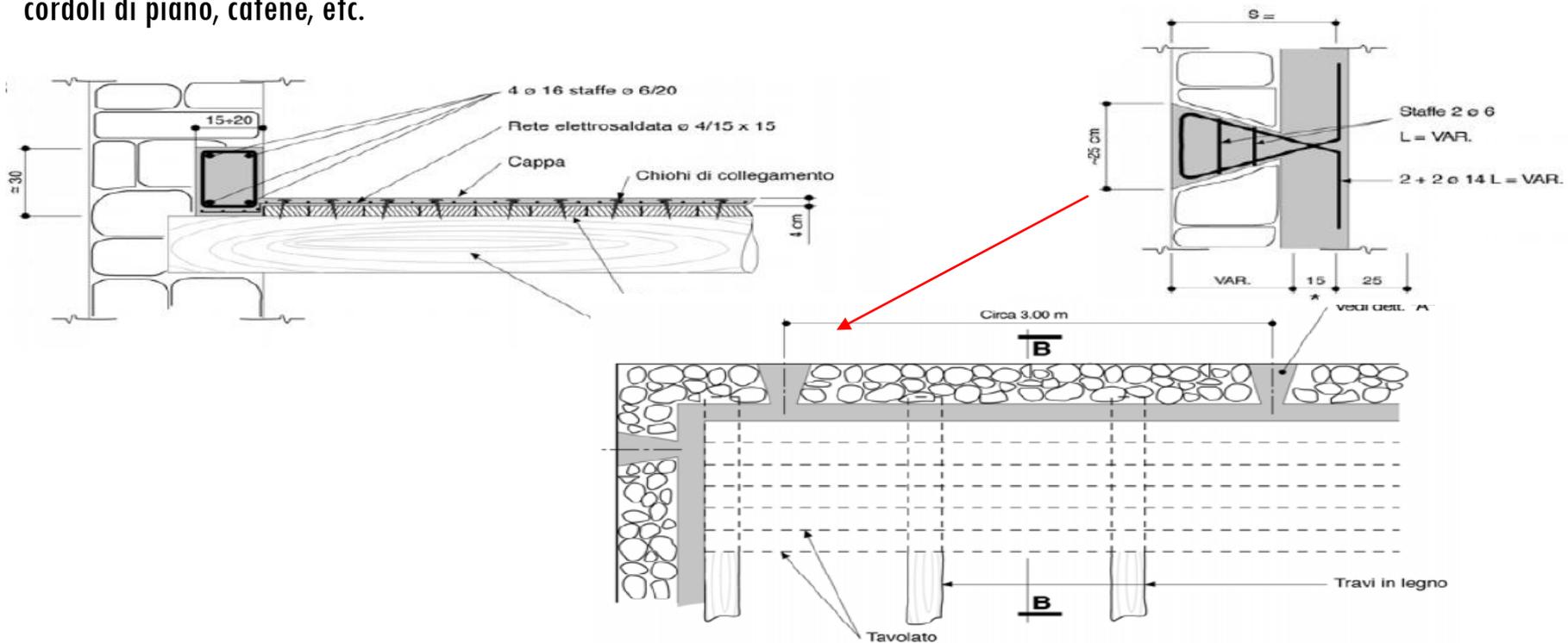
Oltre al **rilievo geometrico**, al fine di ottenere il LC richiesto, risulta particolarmente utile condurre, **preliminarmente** rispetto le verifiche condotte sui materiali:

- Esame dei **tipi** presenti sulla base del materiale, del tipo e finitura del **paramento**, e valutazione della **qualità** della sua **coesione trasversale** in base alla tessitura.
- Esame della tipologia ed **efficienza strutturale degli architravi** al di sopra delle aperture.
- Rilievo di **elementi strutturalmente efficienti**, atti ad eliminare o contrastare eventuali spinte.
- Valutazione della **qualità del collegamento tra pareti verticali**. Evidenziare se tali collegamenti siano assenti.
- Valutazione della **qualità e tipologia di ammorsamento fra parete e solai**. Evidenziare eventuale presenza di **cordoli di piano, catene**, etc.

STRUTTURE IN MURATURA: RILIEVO

Caratterizzazione del materiale e dei particolari costruttivi

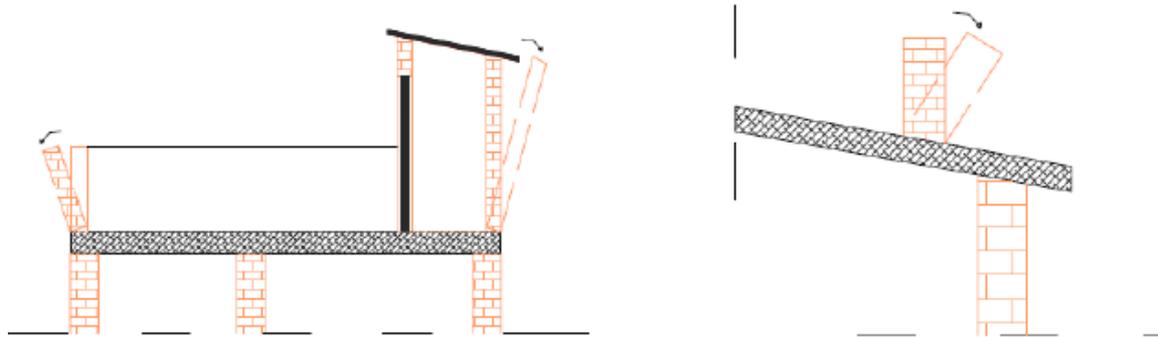
Es: Valutazione della qualità e tipologia di **ammorsamento fra parete e solai**. Evidenziare eventuale presenza di cordoli di piano, catene, etc.



STRUTTURE IN MURATURA: RILIEVO

Ulteriori elementi da analizzare:

- Rilievo di **elementi**, anche non strutturali, **ad alta vulnerabilità**.
- Rilievo **della tipologia e qualità della muratura** (a un paramento, più paramenti, con o senza collegamenti trasversali) eseguita in pietrame o mattoni (regolare o non regolare).
- Rilievo di **discontinuità** della maglia muraria determinate da cavedi, canne fumarie, nicchie, etc.



STRUTTURE IN MURATURA: RILIEVO

Indagini limitate

- Basate unicamente sui rilievi di tipo **visivo**; oltre al **rilievo geometrico** delle superfici esterne degli elementi costruttivi, si eseguono **saggi** che permettono di esaminare, almeno **localmente**, le caratteristiche della muratura sotto all'intonaco e nel suo spessore. Servono a caratterizzare la sezione muraria, il grado di ammorsamento tra le pareti ortogonali, le zone di appoggio dei solai, i dispositivi di collegamento e di eliminazione delle spinte.

Indagini estese

- Rilievi ed indagini in situ, con saggi più **estesi e diffusi** che permettono di ottenere le **tipizzazioni** delle caratteristiche dei materiali e del metodo costruttivo, con sufficiente aderenza alla reale varietà nella costruzione.

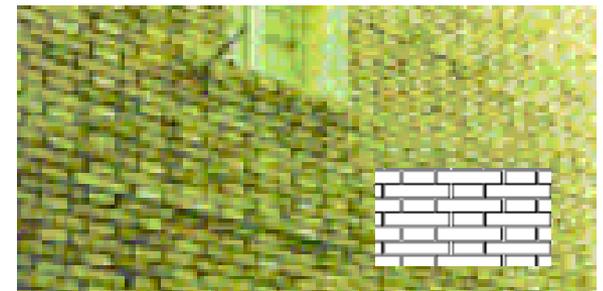
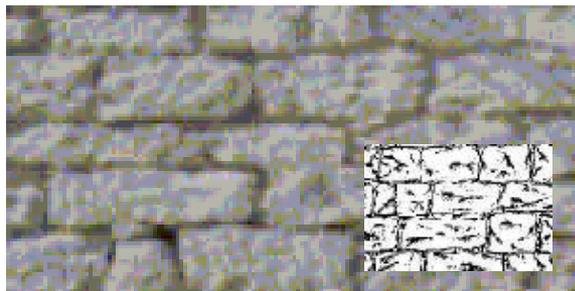
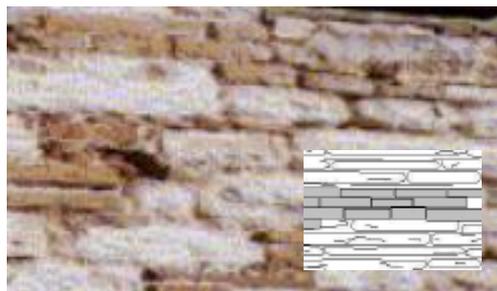
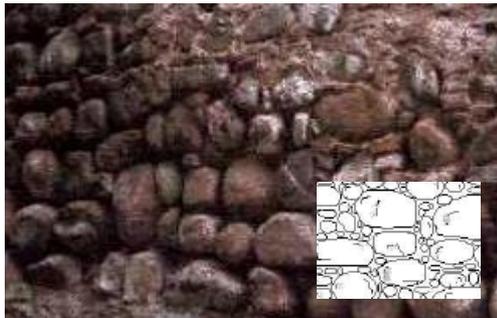
Indagini esaustive

- Come prima, ma **l'uso di saggi è sistematico** al fine di ottenere una chiara identificazione della morfologia e qualità delle murature, sia in superficie che in spessore, sull'efficacia di collegamenti, ammorsamenti, dispositivi di annullamento delle spinte, etc

STRUTTURE IN MURATURA: RILIEVO

Qualità muraria deve essere verificata:

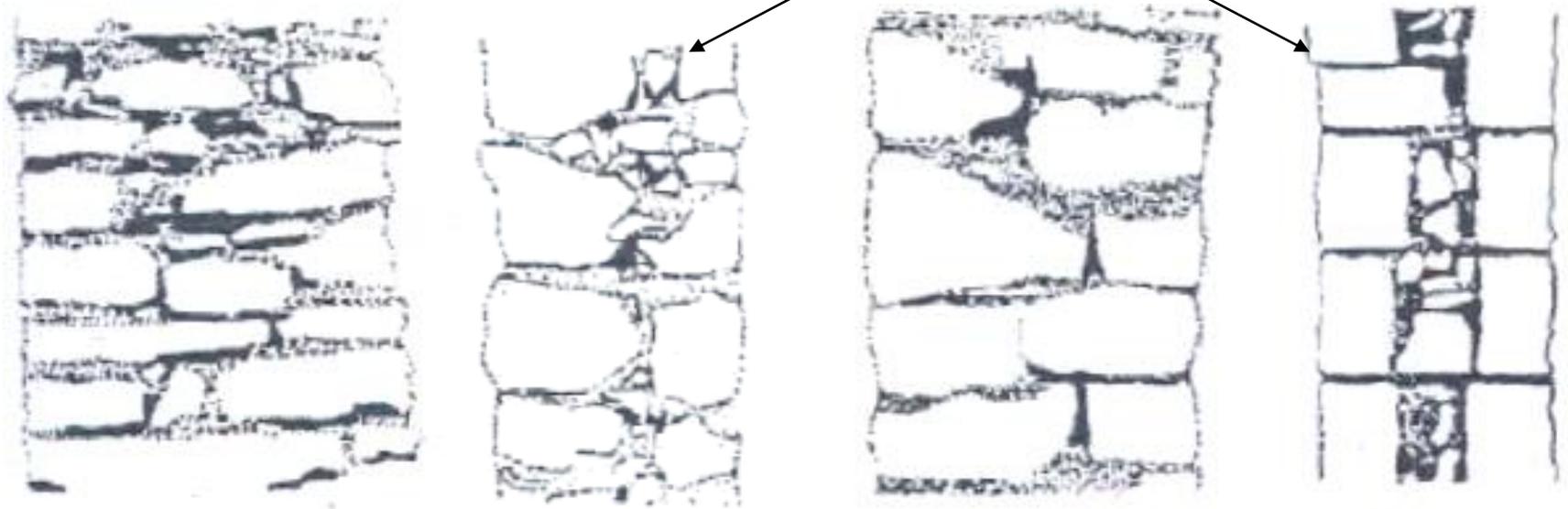
- In situ: rilievo della tessitura in superficie e in tessitura;
- In laboratorio: caratterizzazione di malte, pietre e/o mattoni, porzioni di muratura prelevati in situ.



STRUTTURE IN MURATURA: RILIEVO

Valutazione dell'ammorsamento tra paramenti:

CATTIVO

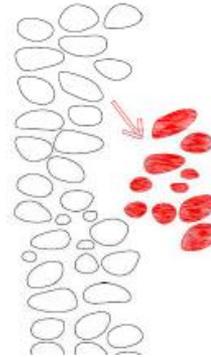


DISCRETO

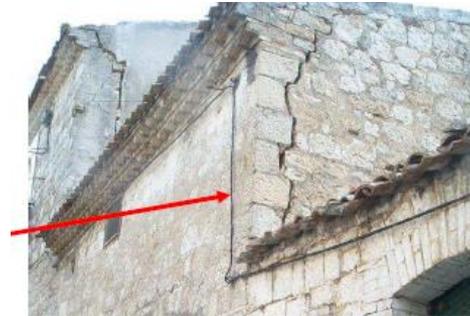
STRUTTURE IN MURATURA: RILIEVO

Valutazione della gerarchia dei collassi:

- **Disgregazione della tessitura muraria**



- **Collasso della parete fuori dal piano**



- **Collasso della parete nel piano**



STRUTTURE IN MURATURA: RILIEVO

Scheda dell'Indice della Qualità Muraria IQM

- 3 indici: IQM_V , IQM_{FP} , IQM_{NP}
- dipendono dai parametri caratteristici della «regola dell'arte»
- valori di $IQM = 0 - 10$
- identificano l'appartenenza del pannello murario analizzato ad una **classe strutturale** omogenea A,B o C

- 
1. Malta di buona qualità / efficace contatto fra elementi / presenza di zeppe **MA.**
 2. Ingranamento trasversale / presenza di diatoni **P.D.**
 3. Elementi resistenti di forma squadrata **F.EL.**
 4. Elementi resistenti di grande dimensione rispetto allo spessore del muro **D.EL.**
 5. Presenza di sfalsamento fra i giunti verticali **S.G.**
 6. Presenza di filari orizzontali **OR.**
 7. Buona qualità degli elementi resistenti **RE.EL.**

STRUTTURE IN MURATURA: RILIEVO

Scheda dell'Indice della Qualità Muraria IQM

Possibili giudizi sui parametri della regola dell'arte:

- parametro rispettato **R.**
- parametro parzialmente rispettato **P.R.**
- parametro non rispettato **N.R.**

Esempio: P.D.

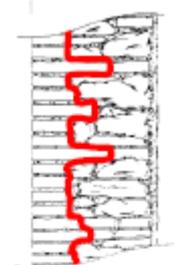
valutazione quantitativa di LMT =
linea minimo tracciato

RISPETTATA

LMT maggiore di 155 cm



LMT = 160 cm

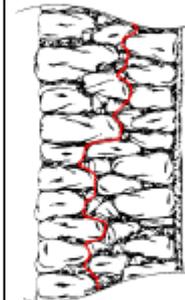


LMT = 176 cm

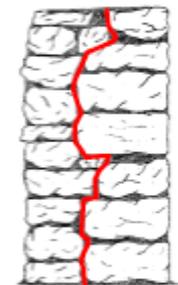
h = 1 m

PARZIALMENTE RISPETTATA

LMT compresa fra 155 cm e 125 cm



LMT = 145 cm



LMT = 126 cm

h = 1 m

NON RISPETTATA

LMT inferiore a 125 cm

Pietre di piccole dimensioni qualunque sia il valore di LMT (es. parete con sacco interno)



LMT = 110 cm



LMT = 120 cm

h = 1 m

STRUTTURE IN MURATURA: RILIEVO

Scheda dell'Indice della Qualità Muraria IQM

Attribuzione dei punteggi:

	IQM verticale		
	NR	PR	R
OR _v	0	1	2
PD _v	0	1	1
FEL _v	0	1.5	3
SG _v	0	0.5	1
DEL _v	0	0.5	1
MA _v	0	0.5	2
REEL _v	0.3	0.7	1

	IQM fuori piano		
	NR	PR	R
OR _{FP}	0	1	2
PD _{FP}	0	1.5	3
FEL _{FP}	0	1	2
SG _{FP}	0	0.5	1
DEL _{FP}	0	0.5	1
MA _{FP}	0	0.5	1
REEL _{FP}	0.5	0.7	1

	IQM nel piano		
	NR	PR	R
OR _{NP}	0	0.5	1
PD _{NP}	0	1	2
FEL _{NP}	0	1	2
SG _{NP}	0	1	2
DEL _{NP}	0	0.5	1
MA _{NP}	0	1	2
REEL _{NP}	0.3	0.7	1

STRUTTURE IN MURATURA: RILIEVO

Scheda dell'Indice della Qualità Muraria IQM

Calcolo dell'indica IQM:

Caso di murature NON in mattoni pieni:

$$IQM_V = REEL_V \times (OR_V + PD_V + FEL_V + SG_V + DEL_V + MA_V)$$

$$IQM_{FP} = REEL_{FP} \times (OR_{FP} + PD_{FP} + FEL_{FP} + SG_{FP} + DEL_{FP} + MA_{FP})$$

$$IQM_{NP} = REEL_{NP} \times (OR_{NP} + PD_{NP} + FEL_{NP} + SG_{NP} + DEL_{NP} + MA_{NP})$$

Caso di murature in mattoni pieni:

$$IQM_V = r_V \times REEL_V \times (OR_V + PD_V + FEL_V + SG_V + DEL_V + MA_V)$$

$$IQM_{FP} = r_{FP} \times REEL_{FP} \times (OR_{FP} + PD_{FP} + FEL_{FP} + SG_{FP} + DEL_{FP} + MA_{FP})$$

$$IQM_{NP} = r_{NP} \times REEL_{NP} \times (OR_{NP} + PD_{NP} + FEL_{NP} + SG_{NP} + DEL_{NP} + MA_{NP})$$

Parametro	r_V	r_{FP}	r_{NP}
MA			
NR	0,2	1	0,1
PR	0,6	1	0,7
R	1	1	1

STRUTTURE IN MURATURA: RILIEVO

Scheda dell'Indice della Qualità Muraria IQM

Classificazione del comportamento strutturale in base a IQM:

Metodo dei punteggi			
Tipo di azione \ Categoria muratura	C	B	A
Azioni verticali	$0 \leq IQ < 2,5$	$2,5 \leq IQ < 5$	$5 \leq IQ \leq 10$
Azioni ortogonali	$0 \leq IQ \leq 4$	$4 < IQ < 7$	$7 \leq IQ \leq 10$
Azioni orizz. complanari	$0 \leq IQ \leq 3$	$3 < IQ \leq 5$	$5 < IQ \leq 10$

az. fuori piano:

A → possibile condurre verifiche locali considerando la parete come **elemento monolitico**. Se ben collegate, le pareti difficilmente collassano F.P.

B → verifiche locali da condurre con ip. di avere **almeno 2 paramenti**.

C → impossibilità condurre verifiche locali. **NON INDICATIVE.** → tipico di murature a sacco!

STRUTTURE IN MURATURA: RILIEVO

Comportamento delle murature in base alla loro tessitura:

- **Muratura a secco:** generalmente possiede ottima resistenza a compressione dei blocchi; resistenza globale ridotta per problematiche connesse ad instabilità dell'equilibrio; difficile caratterizzazione comportamento sotto sisma; bassa resistenza azioni fuori.
- **Muratura «legata»:** limite di resistenza generalmente fornito dalla qualità del legante; ridotta problematica di instabilità dell'equilibrio; buona distribuzione delle tensioni, dipendentemente dalla qualità del legante; se regolare, facile classificazione comportamento sotto azione sismica; buona resistenza azioni nel piano e fuori piano se bel legata.
- **Muratura a doppio parametro con nucleo:** non elevata resistenza meccanica della parete; se diatoni assenti, elevata probabilità di collasso per instabilità dell'equilibrio dei paramenti; sotto sisma, comportamento fortemente ortotropo; buona resistenza azioni nel piano.

STRUTTURE IN MURATURA: CARATTERIZZAZIONE MATERIALI

Prelievi: solo laboratori qualificati per prove a carattere distruttivo che necessitino di certificato di prova.

Prove limitate (ad es. necessarie per LC1)

- basate principalmente **su esami visivi delle superfici**, che prevedono limitati controlli degli elementi costituenti la muratura. Lo scopo è identificare, **per aree omogenee**, le **tipologie di muratura** alla quale fare riferimento ai fini della determinazione delle proprietà meccaniche. Si conduce il **rilievo della tessitura muraria** dei paramenti ed una **stima della sezione muraria**. —————> **Almeno un esame per ogni tipo di muratura presente e per ogni piano dell'edificio.**

Prove estese (ad es. necessarie per LC2)

- indagini **visive, diffuse e sistematiche**, accompagnate da **approfondimenti locali**, sia in **superficie** che in **spessore**. Lo scopo è conoscere la morfologia interna del materiale, le zone omogenee, la tessitura muraria, la presenza di dispositivi di collegamento e l'identificazione di degrado. Si analizzano le malte, gli elementi costituenti. Si usano **prove non distruttive e mediamente distruttive**. —————> **Almeno una prova per ogni tipo di muratura**

STRUTTURE IN MURATURA: CARATTERIZZAZIONE MATERIALI

Prove esaustive (ad es. per LC3)

- Come prima, in più **prove distruttive e mediamente distruttive** sui materiali per determinarne i parametri meccanici. Il progettista ne stabilisce tipologia e quantità in base al LC richiesto della struttura. Le prove devono essere eseguite o in situ o in laboratorio su elementi indisturbati prelevati in situ, su tutte le tipologie di muratura riscontrate in aree omogenee. —————> **Almeno tre prove per ogni tipo di muratura.**

Prove sperimentali per la valutazione diretta dei parametri meccanici della muratura:

- Prove di compressione
- Prove di taglio

Prove non dirette (mediamente e non distruttive):

- Martinetti piatti singoli e doppi
- Prove soniche
- Prove endoscopiche

STRUTTURE IN MURATURA: CARATTERIZZAZIONE MATERIALI

- **Tipologie di muratura ricorrenti: parametri meccanici base**

Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{V0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min- max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	- -	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbalzati, 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 quadrati	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

Per **verifiche sismiche**, nel caso di qualità molto scadente della malta ($f_m < 0.7\text{MPa}$) → applicare coeff. riduttivo x 0.7 per resistenze, x 0.8 per modulo elastico.

→ x 1.2 con zeppe profonde in pietra (aumento ammorsamento pietre)

→ x 0.7 (f), x 0.8 (E) se giunti di malta con spessore > 13mm.

STRUTTURE IN MURATURA: CARATTERIZZAZIONE MATERIALI

- **Tipologie di muratura ricorrenti: coefficienti correttivi ai parametri meccanici base**

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

Coefficienti da applicare anche nel caso di **progetto di intervento** su muratura esistente.

Valori considerati come riferimento, in assenza di specifiche valutazioni sui valori da adottare per il caso in esame.

LC1 (FC=1.35):

**resistenze: valori minimi
moduli elastici: valori medi**

LC2 (FC=1.2):

**resistenze: valori medi
moduli elastici: valori medi**