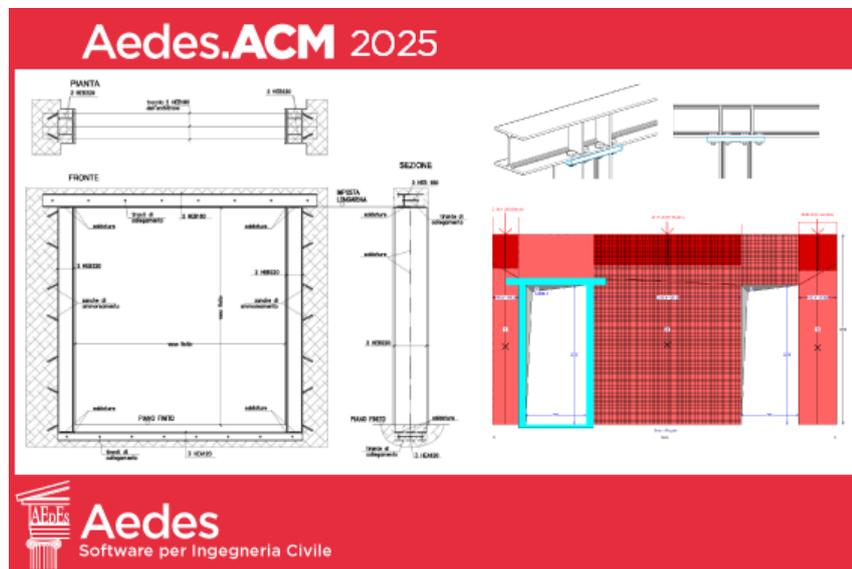


Copyright



Aedes
Software per Ingegneria Civile



Aedes.ACM 2025

APERTURE E CERCHIATURE IN MURATURE PORTANTI

Aggiornamenti recenti

Estratto dal Manuale di Aedes.ACM 2025.

- **Interventi locali su murature scadenti: disgregazione, ristilatura dei giunti**

Ultima revisione di questo documento: 20.01.2025

Tutti i diritti sono riservati, anche di riproduzione parziale, a norma di legge e delle convenzioni internazionali. Nessuna parte di questo volume può essere riprodotta in qualsiasi forma o mezzo elettronico o meccanico, per alcun uso, senza il permesso scritto della AEDES Software per Ingegneria Civile.

© 1997-2025 AEDES Software per Ingegneria Civile

Via F. Aporti 32 - 56028 SAN MINIATO (PI)

Tel.: +39 0571 401073 - www.aedes.it

Amministrazione: info@aedes.it - Supporto tecnico: assistenza@aedes.it

AVVERTENZE E CONDIZIONI D'USO

La AEDES Software si riserva il diritto di apportare miglioramenti o modifiche al programma Aedes.ACM (indicato con: ACM), descritto nella documentazione ad esso associata, in qualsiasi momento e senza preavviso.

Il software e la documentazione allegata, anche se curati con scrupolosa attenzione, non possono comportare specifiche responsabilità di AEDES per involontari errori o inesattezze: pertanto, l'utilizzatore è tenuto a controllare l'esattezza e la completezza del materiale utilizzato. Le correzioni relative ad eventuali errori tipografici saranno incluse nelle versioni di aggiornamento.

ACM è di esclusiva proprietà della AEDES e viene concesso in uso non esclusivo secondo i termini e le condizioni riportati nel contratto di licenza d'uso. L'utente non avrà diritto ad utilizzare ACM fino a quando non avrà sottoscritto la suddetta licenza d'uso.

L'utente è responsabile della scelta di ACM al fine del raggiungimento dei risultati voluti, nonché dell'installazione, dell'uso dello stesso e dei relativi risultati.

Le sole garanzie fornite dalla AEDES in merito a ACM sono quelle riportate nella licenza d'uso. La AEDES non garantisce che le funzioni contenute in ACM soddisfino le esigenze dell'utente o funzionino in tutte le combinazioni che possono essere scelte per l'uso da parte dell'utente.

I nomi dei prodotti citati nella documentazione di ACM possono essere marchi di fabbrica o marchi registrati dalle rispettive Società.

INDICE

INTERVENTI LOCALI SU MURATURE SCADENTI: DISGREGAZIONE, RISTILATURA DEI GIUNTI

INDICE

1. INTERVENTO LOCALE CON TELAIO DI CERCHIATURA SU MURATURA SCADENTE

2. MODIFICA DI UN'APERTURA IN UNA PARETE MURARIA DI SCARSA QUALITA'

3. IPOTESI (A): MURATURA SCADENTE MA NON SOGGETTA A DISGREGAZIONE

4. RISTILATURA DEI GIUNTI NON ARMATA: MODELLAZIONE DELL'INTERVENTO

5. IPOTESI (A): STATI DI PROGETTO CON RIGENERAZIONE DELLA MALTA
E RINFORZI IN ACCIAIO

6. DISGREGAZIONE DELLA MURATURA: FORMULAZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO

7. IPOTESI (B): MURATURA SCADENTE SOGGETTA A POSSIBILE DISGREGAZIONE

8. IPOTESI (B): STATI DI PROGETTO CON RIGENERAZIONE DELLA MALTA
E RINFORZI IN ACCIAIO

CONCLUSIONI

RINGRAZIAMENTI

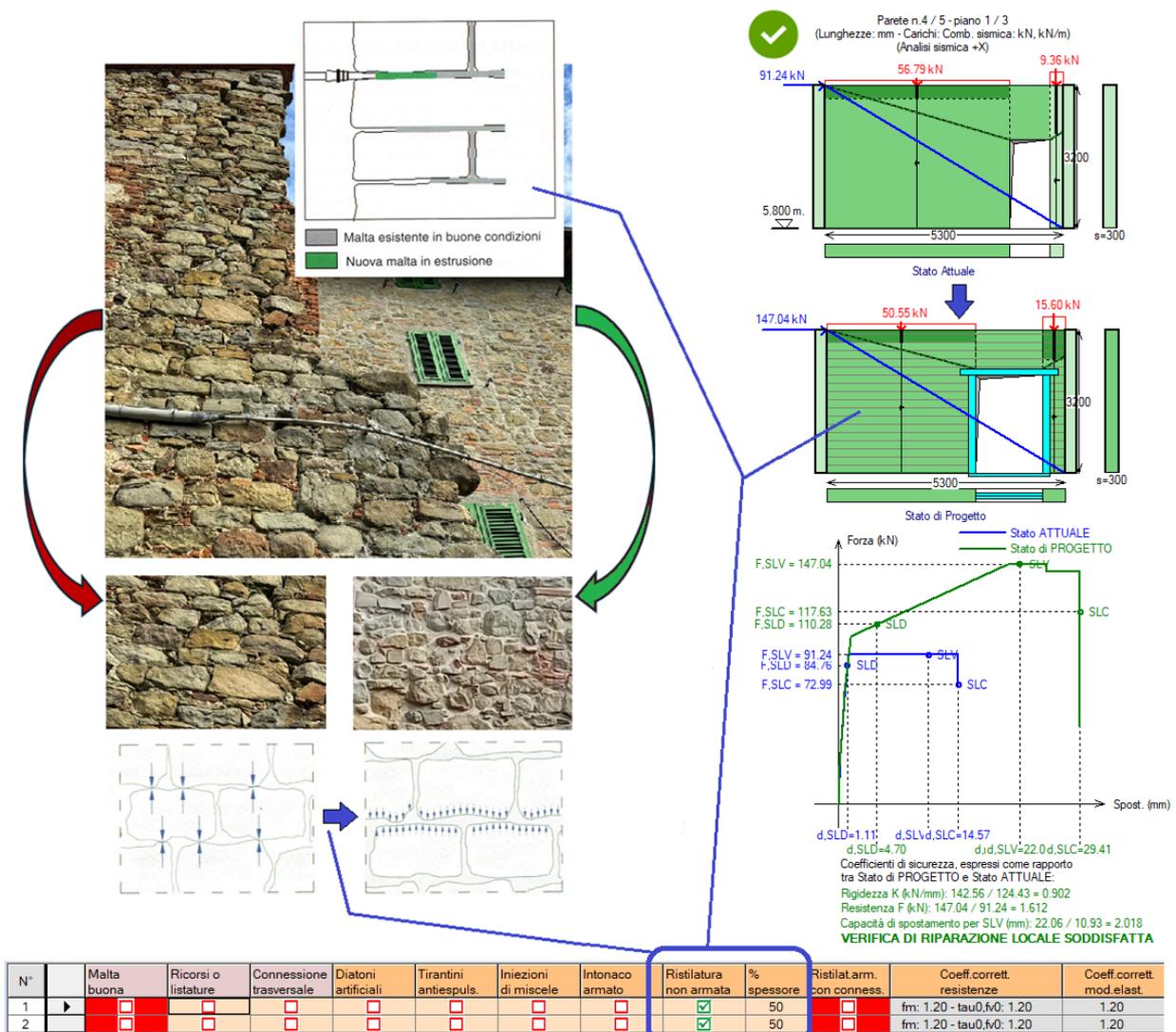
BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

INTERVENTI LOCALI SU MURATURE SCADENTI: DISGREGAZIONE, RISTILATURA DEI GIUNTI

Autore: Francesco Pugi, Ricerca e Sviluppo di AEDES Software

Articolo pubblicato su Ingegno (19.11.2024)

- In un intervento locale su una parete muraria per la **realizzazione di una nuova apertura o la modifica di una esistente, l'inserimento di un telaio di cerchiatura**, con collegamento alla muratura esistente, **richiede muratura, e quindi malta, di buona qualità**, altrimenti all'interfaccia telaio-muro si innescano disgregazioni. **Una malta scadente può essere rigenerata con un intervento di ristilatura profonda dei giunti**, eventualmente armata.
- La ristilatura profonda dei giunti determina **incrementi di resistenza e di rigidezza che dipendono dallo spessore della muratura e dalla profondità di scarnitura**. Nelle NTC18 la **ristilatura non armata** non compare fra i tipi di consolidamento che migliorano i parametri meccanici tramite coefficienti correttivi. Nel presente lavoro si propone un **metodo coerente con le Normativa** per definire **coefficienti correttivi per la ristilatura non armata**.
- **Se nello stato di fatto la malta scadente si accompagna all'assenza di ricorsi e di connessioni trasversali**, sotto azioni sismiche la parete può essere soggetta a **disgregazione, crisi di tipo fragile**. La necessaria riqualificazione della muratura le conferisce una **duttilità originariamente assente**: il confronto fra Stato di Progetto e Stato Attuale in termini di capacità di spostamento dovrà ritenersi automaticamente soddisfatto.



INDICE

- [1. Intervento locale con telaio di cerchiatura su muratura scadente](#)
 - [2. Modifica di un'apertura in una parete in muratura di scarsa qualità](#)
 - [3. Ipotesi \(A\): muratura scadente ma non soggetta a disgregazione](#)
 - [4. Ristilatura dei giunti non armata: modellazione dell'intervento](#)
 - [5. Ipotesi \(A\): stati di progetto con rigenerazione della malta e rinforzi in acciaio](#)
 - [6. Disgregazione della muratura: formulazione del modello di calcolo](#)
 - [7. Ipotesi \(B\): muratura scadente soggetta a possibile disgregazione](#)
 - [8. Ipotesi \(B\): stati di progetto con rigenerazione della malta e rinforzi in acciaio](#)
- [Conclusioni](#)

[Ringraziamenti](#)

[Bibliografia di riferimento](#)

1. INTERVENTO LOCALE CON TELAIO DI CERCHIATURA SU MURATURA SCADENTE

Come noto, gli interventi locali sulle pareti in muratura, fra i quali quelli che prevedono la modifica di aperture esistenti o la realizzazione di nuove aperture con posizionamento di telai di cerchiatura, vengono dimensionati attraverso verifiche di confronto fra Stato Attuale e Stato di Progetto riguardanti rigidità, resistenza e capacità di spostamento. Risulta così soddisfatto il controllo sulla sicurezza statica e sismica della parete oggetto di intervento.

Le verifiche di sicurezza sono determinate dalle caratteristiche meccaniche della muratura allo stato di fatto, e dalle modifiche strutturali previste dal progetto. **L'inserimento di un telaio di cerchiatura**, con collegamento alla muratura esistente, **richiede muratura, e quindi malta, di buona qualità, altrimenti all'interfaccia telaio-muro si innescano disgregazioni**. Pertanto, un intervento locale che, a causa di modifiche sulle aperture, richieda un telaio di cerchiatura deve prevedere necessariamente la rigenerazione della malta. **Una malta scadente può essere rigenerata con un intervento di ristilatura profonda dei giunti**, eventualmente armata.

La ristilatura profonda dei giunti determina un **incremento di resistenza che dipende dallo spessore della muratura e dalla profondità di scarnitura**. La Normativa cita la **ristilatura dei giunti nell'ambito degli interventi di consolidamento**:

C8.7.4.1 Criteri per gli interventi di consolidamento degli edifici in muratura

4. Incremento della capacità delle pareti

"(...) L'intervento di ristilatura dei giunti, se effettuato su entrambe le superfici esterne, può migliorare le caratteristiche meccaniche della muratura incrementandone, di fatto, l'area resistente. Particolare cura deve essere rivolta alla scelta della malta da utilizzare in relazione a quella esistente. L'eventuale inserimento nei giunti "ristilati" di piccole barre, trefoli o piattine metalliche o di altri materiali resistenti a trazione, specie se ancorati alla muratura attraverso connessioni trasversali dei paramenti ed organizzati come sistema continuo nelle tre direzioni, può migliorare ulteriormente l'efficacia dell'intervento. (...)"

La ristilatura non armata è quindi presente nel testo normativo, ma non viene esplicitamente inclusa negli Interventi di consolidamento che migliorano i parametri meccanici tramite coefficienti correttivi (cfr. Tab. C8.5.II). Nel presente lavoro **si propone un metodo coerente con la Normativa al fine di individuare idonei coefficienti correttivi per l'intervento di ristilatura non armata**.

Lo studio dell'intervento su una parete caratterizzata da malta scadente, per la quale è prevista la riqualificazione della muratura attraverso la ristilatura profonda dei giunti, richiede inoltre un approfondimento qualora allo stato di fatto **la malta scadente si accompagni all'assenza di ricorsi e di connessioni trasversali**: in tal caso, sotto un'accelerazione sismica rilevante la parete è soggetta a **disgregazione, una crisi di tipo fragile** particolarmente temibile che precede l'attivazione dei cinematicismi per corpi rigidi e lo sviluppo delle capacità di resistenza e di deformazione.

In tal caso, venendo a mancare le risorse di duttilità, **il modello elasto-plastico degrada in elasto-fragile**: l'annullamento del tratto plastico consente il rispetto della Normativa, che in §C8.7.1 indica l'opportunità di "riconoscere e analizzare, per quanto possibile, tutte le criticità locali (anche quelle difficilmente quantificabili) che possano determinare situazioni di fragilità e rotture rovinose in occasione di scuotimenti". **La necessaria riqualificazione della muratura conferirà alla parete una duttilità originariamente assente**: l'evoluzione del comportamento da fragile a duttile influisce sul confronto fra Stato di Progetto e Stato Attuale ed è opportuno indagare sulle conseguenti verifiche di sicurezza.

A titolo di esempio, verrà considerata una parete in muratura di pietrame sbizzato con malta scadente, avente allo stato di fatto un'apertura in una posizione prossima all'intersezione con la parete ortogonale.

L'intervento di progetto prevede lo spostamento dell'apertura verso la zona centrale, aumentandone larghezza e altezza; l'obiettivo è inquadrare l'ambito dell'intervento come locale, secondo i requisiti di sicurezza richiesti dalla Normativa, prevedendo per la muratura un intervento di rigenerazione della malta con ristilatura profonda dei giunti.

L'esempio verrà illustrato sotto due distinte ipotesi relative allo Stato Attuale:

- ipotesi (A): anzitutto, si considera una qualità muraria sufficiente per impedire il fenomeno della disgregazione, grazie alla presenza di ricorsi e di connessione trasversale;
- ipotesi (B): successivamente, si analizza la medesima parete ipotizzando che la malta scadente si accompagni all'assenza di ricorsi e di connessione trasversale: questa tipologia, in dipendenza dall'entità dell'accelerazione sismica, risulta soggetta a possibile disgregazione.

2. MODIFICA DI UN'APERTURA IN UNA PARETE IN MURATURA DI SCARSA QUALITÀ'

In una parete in muratura di pietrame a conci sbozzati di scarsa qualità, con malta scadente, è previsto un intervento di modifica di un'apertura. Allo Stato Attuale, l'apertura è posta in una posizione prossima all'intersezione con la parete ortogonale ed ha dimensioni: larghezza 90 cm, altezza 200 cm. La parete ha altezza di interpiano pari a 3.20 m, e spessore 30 cm. ed è sottoposta ai carichi statici mostrati in figura (con riferimento alla combinazione fondamentale SLU). La parete è interna, si trova al terzo e ultimo piano di un edificio avente altezza $H=9.00$ m. ed ha quota di base 5.80 m. L'edificio si suppone ubicato nel comune di San Miniato (PI), e la PGA corrispondente a SLV è pari a: $ag \cdot S = 0.126 \cdot 1.200 = 0.151$ g.

Allo Stato di Progetto, si prevedono le seguenti modifiche:

- la mazzetta attualmente di dimensione 30 cm. viene portata a 50 cm.
- il vano dell'apertura diviene più grande: la larghezza diventa 150 cm. e l'altezza 220 cm.

In Fig. 1 è rappresentata la parete oggetto di intervento (i carichi si riferiscono alla combinazione SLU per analisi statica).

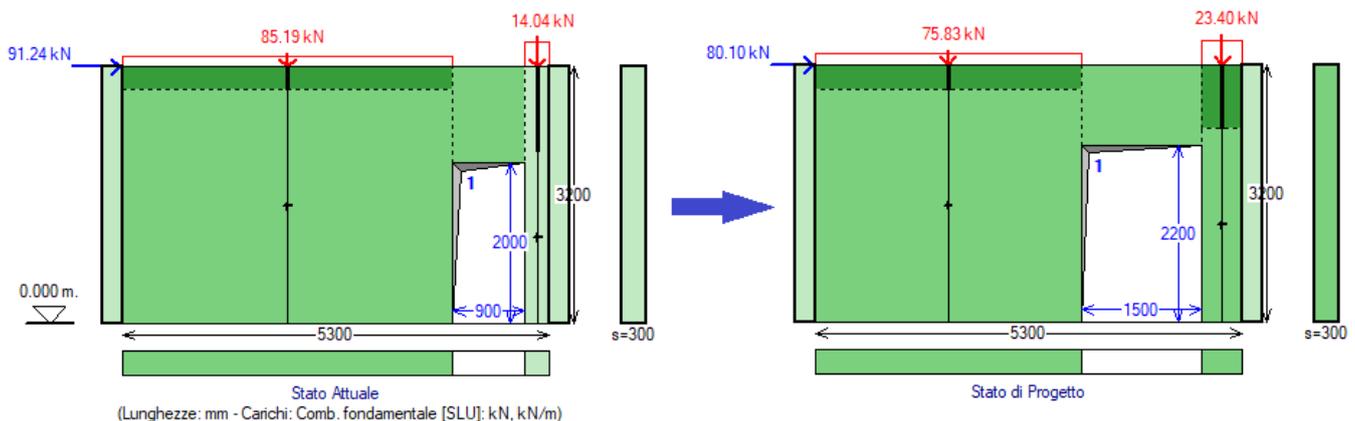


Fig. 1. Parete oggetto di intervento

A priori, si può immediatamente affermare che il progetto richiederà un consolidamento della muratura; inoltre, potrebbe essere necessario realizzare un telaio di cerchiatura a delimitazione della nuova apertura. **Dal punto di vista strutturale, la scarsa qualità muraria visivamente riscontrata deve essere analizzata con attenzione in modo da poter inquadrare le effettive capacità meccaniche dell'elemento strutturale.**

In un caso di questo tipo non appare appropriato adottare direttamente i parametri meccanici proposti

nella tabella normativa (Tab. C8.5.l) per la muratura a conci sbozzati, classe tipologica a cui la parete appartiene: occorre indagare sull'effettivo grado di rappresentatività della classificazione proposta, e a questo scopo la Normativa stessa indica in §C8.5.3.1 che è possibile avvalersi di metodi che, utilizzando la lettura visiva dei paramenti e della sezione, consentono di ottenere stime dei parametri meccanici attraverso indicatori di qualità muraria, purché elaborati con procedure di comprovata attendibilità.

Il metodo dell'Indice di Qualità Muraria (IQM) per la valutazione della qualità meccanica delle Murature, messo a punto da Antonio Borri e Alessandro De Maria [1] [2] [3], si basa su un esame visivo dei paramenti e della sezione di un pannello murario, con lo scopo di verificare il grado di rispetto delle regole dell'arte muraria.

Sulla base di tali verifiche si perviene ad un indice numerico che appare ben correlato sia con i parametri meccanici più significativi della muratura in esame, sia con le risposte strutturali attese. IQM consente inoltre una valutazione della maggiore o minore propensione alla disgregazione delle murature soggette alle azioni sismiche, un aspetto determinante nel caso di murature storiche dove si rileva una qualità mediocre con una scarsa consistenza della malta.

La parete in esame è stata quindi analizzata con i criteri del metodo IQM, classificando i parametri richiesti:

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

Basandosi sull'osservazione dei paramenti e della sezione muraria si valuta il rispetto o meno delle regole dell'arte. I possibili giudizi per ciascun parametro sono:

- R.** = rispettato;
- P.R.** = parzialmente rispettato;
- N.R.** = non rispettato.

3. IPOTESI (A): MURATURA SCADENTE MA NON SOGGETTA A DISGREGAZIONE

Nell'ipotesi (A) la malta risulta scadente ma nella parete sono presenti alcuni filari orizzontali e diatoni in grado di assicurare una connessione trasversale fra i due paramenti murari (coincidenti con le facce della parete).

La scheda di analisi della parete con l'app IQMindex [4] ha prodotto i risultati di seguito riportati (in fig.2 si riporta un caso analogo, per una muratura di blocchi di pietra sbozzata, ciottoli e pietrame a doppio paramento).

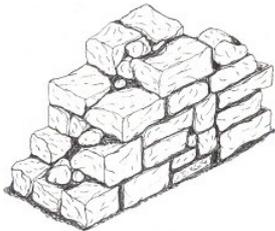
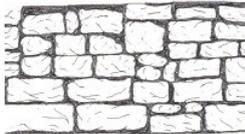
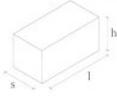
SCHEDA		5. METODI QUALITATIVI PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ MURARIA		
11	280	Muratura di blocchi di pietra sbazzata, ciottoli e pietrame a doppio paramento		
 Assonometria	 Prospetto	 Sezione	FOTO	
	Dimensioni e forme ricorrenti dei blocchi: $s = 10 \div 17 \text{ cm}$ $h = 9 \div 17 \text{ cm}$ $l = 15 \div 30 \text{ cm}$			GEOMETRIA

Fig. 2. Esempio di scheda per la valutazione dell'Indice di Qualità Muraria (da [1])

Dimensioni ricorrenti degli elementi: altezza $10 \div 17 \text{ cm}$, lunghezza $9 \div 17$, profondità $15 \div 30 \text{ cm}$

Parametri della regola dell'arte:

P.D.=R, **MA.**=NR, **F.EL.**=PR, **S.G.**=NR, **RE.EL.**=R, **OR.**=R, **D.EL.**=PR

con applicazione del correttivo per malta di pessima qualità.

Risultati per i punteggi di IQM: Azioni Verticali: 3.5, Azioni Fuori Piano: 4.55, Azioni Nel Piano: 3.15

IQM fuori piano risulta > 4 . Secondo la formulazione del metodo IQM, **la muratura in esame non è soggetta a disgregazione**¹.

¹ Nel metodo IQM, come specificato dagli Autori [3], quando si afferma che "una muratura si può disgregare se il suo IQM è inferiore ad un certo valore", si intende dire solo che, basandosi sulle osservazioni fatte in occasione dei sismi precedenti, tipologie murarie che avevano quelle determinate caratteristiche hanno presentato il fenomeno della disgregazione con notevole frequenza, ed è quindi logico attendersi un comportamento simile per sismi di analoghe caratteristiche. Tenendo come riferimento le macrocategorie delle tipologie murarie contemplate nella normativa italiana, sulla base delle esperienze condotte nei rilevamenti post sismici dei vari terremoti italiani, gli Autori hanno individuato, per gli edifici ordinari posti in zone con pericolosità sismica medio-alta, il valore di IQM fuori piano = 4 come valore di soglia. Valori di IQM fuori piano eguali od inferiori a 4 dovrebbero richiamare l'attenzione nei confronti di possibili fenomeni disgregativi da parte di chi effettua una valutazione di sicurezza o si accinge ad intervenire su un edificio in zona sismica.

Risultati per i parametri meccanici:

(N/mm ²)	min	med	max
f _m	2.07	2.73	3.38
τ ₀	0.039	0.052	0.064
E	1047	1268	1488
G	333	401	469

In grassetto sono riportati i valori da utilizzare per la modellazione strutturale dello Stato Attuale della parete, ossia i valori minimi per le resistenze e medi per i moduli elastici, in corrispondenza del livello di conoscenza LC1 (come richiesto dalla Normativa in §C8.5.4).

Per quanto riguarda lo Stato di Progetto, gli interventi di consolidamento dovranno prevedere una rigenerazione della malta che la porti dall'iniziale pessima qualità a condizioni buone. Poiché i coefficienti correttivi sono applicati alle condizioni 'standard' (malta di modeste caratteristiche, cfr. §C8.5.3.1), occorre valutare le proprietà della muratura senza il correttivo per malta di pessima qualità. La scheda IQM elaborata per la muratura già esaminata ma senza correttivo per malta di pessima qualità conduce ai valori degli indici ed i parametri meccanici qui di seguito riportati.

Risultati per i punteggi di IQM: Azioni Verticali: 5, Azioni Fuori Piano: 6.5, Azioni Nel Piano: 4.5 tutti ovviamente maggiori rispetto al caso di malta pessima. I parametri meccanici, da considerare alla base dello Stato di Progetto, sono i seguenti:

(N/mm ²)	min	med	max
f _m	2.78	3.60	4.40
τ ₀	0.051	0.069	0.085
E	1322	1597	1871
G	404	487	569

La parete muraria viene analizzata con il software Aedes.ACM [5], nel quale è possibile inserire parametri meccanici personalizzati diversificati fra Stato Attuale e Stato di Progetto.

Si osservi che, avendo valutato i parametri mediante IQM, non risulta necessario utilizzare nel software opzioni riguardanti lo Stato di Fatto, che secondo la Tab. C8.5.11 regolano la presenza o meno di malta buona, ricorsi o listature, connessione trasversale: le caratteristiche specifiche della parete esaminata sono state già considerate nel calcolo di IQM e dei parametri meccanici corrispondenti.

La parete verrà analizzata con diversi Stati di Progetto che prevedono la rigenerazione della malta tramite ristilatura non armata e il posizionamento di elementi di rinforzo in acciaio (sola architrave o telaio di cerchiatura). Essendo prevista la ristilatura dei giunti non armata, prima di procedere con le verifiche di confronto fra gli Stati di Progetto e lo Stato Attuale è anzitutto necessario individuare la modalità con cui è possibile rappresentare questo tipo di intervento di consolidamento nel modello di calcolo.

4. RISTILATURA DEI GIUNTI NON ARMATA: MODELLAZIONE DELL'INTERVENTO

Come osservato in precedenza, la Normativa tratta esplicitamente la ristilatura dei giunti nell'ambito degli interventi di consolidamento (§C8.7.4.1), considerando anche un eventuale inserimento di armature quali piccole barre o altri materiali resistenti a trazione.

La ristilatura non armata è quindi contemplata fra gli interventi di consolidamento, tuttavia per questo intervento non c'è una corrispondenza diretta nella tabella dei coefficienti correttivi (Tab. C8.5.II) proposta dalla Normativa per la valutazione dell'incremento dei parametri meccanici a seguito dei vari tipi di consolidamento. E' pertanto indispensabile definire un metodo per valutare gli effetti dell'intervento tramite ristilatura non armata, metodo che ovviamente deve essere coerente con le indicazioni normative.

Come evidenziato in fig. 3, la tabella citata propone un coefficiente correttivo specifico per la malta buona, nel gruppo di valutazione dello Stato di fatto (fig. 3).

Tipologia di muratura	Stato di fatto			Interventi di consolidamento			
	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Iniezione di miscele leganti (*)	Intonacoarmato (**)	Ristilatura armata con connessione dei paramenti (**)	Massimo coefficiente complessivo
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	1,3	1,5	2	2,5	1,6	3,5
Muratura a conci sbazzati, 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 squadriati	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

Fig. 3. Coefficienti correttivi per lo stato di fatto e per gli interventi di consolidamento

La Normativa specifica, inoltre, che "i valori indicati in tabella per i vari tipi di consolidamento delle murature devono essere considerati essenzialmente un riferimento, in assenza di specifiche valutazioni sui valori da adottare per il caso in esame; nel caso di tecniche diverse da quelle indicate nella tabella, i valori riportati costituiscono un utile riferimento".

Pertanto, tali valori costituiscono un riferimento anche per la ristilatura dei giunti non armata.

La qualifica di 'malta buona' fa riferimento a una malta avente migliori caratteristiche rispetto a quella cui si riferisce la tabella C8.5.I che fornisce i parametri meccanici di riferimento, ed il coefficiente correttivo corrispondente si applica sia alle resistenze sia ai moduli elastici.

Per quanto riguarda le caratteristiche dell'intervento di scarnitura e ristilatura profonda dei giunti, si può osservare (fig. 4, tratta da [1]) che esso in generale non prevede la totale sostituzione della malta (anche se l'intervento è applicabile, quando possibile, sui due lati del paramento).



Fig. 1 - Muratura in pietraforte fortemente degradata per erosione e decoesione dei giunti di malta. Il degrado avanzato delle malte può provocare il distacco dei blocchi lapidei con instabilizzazione e caduta degli stessi.

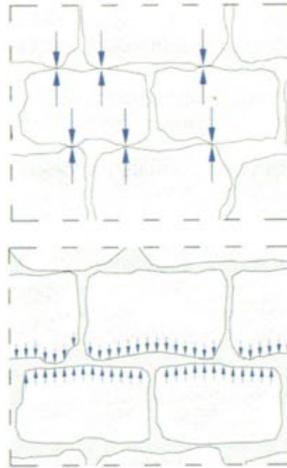


Fig. 2 - In mancanza di malta, il contatto tra i conci è di tipo puntuale e le forze che vengono scambiate assumono valori anche molto elevati. La presenza della malta interposta tra i conci, al contrario, consente di realizzare un appoggio continuo contribuendo così a ripartire le forze di contatto.

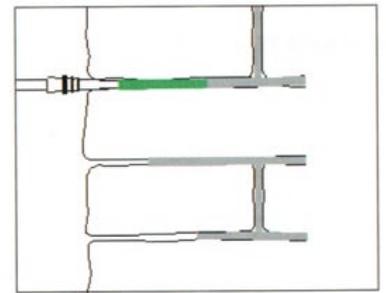


Fig. 4 - Schema di intervento
 ■ Malta esistente in buone condizioni
 ■ Nuova malta in estrusione

Fig. 4 - Schema di intervento

Fig. 4. Intervento di scarnitura e ristilatura profonda dei giunti

Poiché la nuova malta interessa una porzione dello spessore più o meno profonda, l'entità del miglioramento rispetto allo stato di fatto è in stretta correlazione con la porzione di giunto interessata dall'intervento.

Avendo quindi la disponibilità di un coefficiente correttivo relativo alla 'malta buona', è immediato commisurare l'efficacia dell'intervento di ristilatura dei giunti alla percentuale di giunto risanato.

Ad esempio, per la muratura a conci sbozzati il coefficiente correttivo per malta buona è pari a 1.4.

Il 40% di miglioramento è quindi riferito ad un intervento su tutto lo spessore. Se la parte di giunto interessata dalla ristilatura è pari ad esempio a $(1/2)=50\%$ dello spessore, il coefficiente correttivo che può essere adottato è dato da: $1.0 + (0.4 \cdot 1/2) = 1.2$.

Pertanto, posto: c_{MB} il coefficiente correttivo per malta buona, c_{RN} quello per ristilatura non armata, $s\%$ la percentuale di intervento di risanamento sullo spessore della parete, si ha:

$$c_{RN} = 1.0 + (c_{MB} - 1.0) \cdot s\%$$

Per ovvie ragioni, l'intervento di ristilatura non armata non può essere contemporaneo alla qualifica di 'malta buona' per lo stato di fatto: richiede tuttavia la malta in condizioni 'standard' (modeste caratteristiche) a cui fa riferimento la Tab.C8.5.I alla quale si riferiscono le amplificazioni dei vari tipi di consolidamento tramite coefficienti correttivi.

5. IPOTESI (A): STATI DI PROGETTO CON RIGENERAZIONE DELLA MALTA E RINFORZI IN ACCIAIO

Per l'ipotesi (A) dell'esempio applicativo proposto (malta scadente ma non soggetta a disgregazione), si analizzano le seguenti configurazioni di progetto:

- (1) nessun intervento sulla muratura né realizzazione di rinforzi: questa configurazione non corrisponde ad un effettivo Stato di Progetto ma viene proposta per mostrare il peggioramento indotto dalla modifica dell'apertura;
- (2) nessun intervento sulla muratura, ma realizzazione di un telaio di cerchiatura con montanti in acciaio con sezione a C, in corrispondenza degli stipiti, aventi spessore $s=10$ mm, profondità 300 mm come la parete e dimensione dell'ala (nel piano della parete) pari a 300 mm.;
- (3) consolidamento della muratura mediante ristilatura dei giunti non armata e posizionamento di un'architrave in corrispondenza della nuova apertura;
- (4) consolidamento della muratura mediante ristilatura dei giunti non armata e realizzazione di un telaio di

cerchiatura con montanti in acciaio con sezione a C, in corrispondenza degli stipiti, aventi spessore $s=10$ mm, profondità 300 mm come la parete e dimensione dell'ala (nel piano della parete) pari a 150 mm.; (5) come (4) ma con dimensioni dei montanti 10x300x250 mm. I risultati sono riportati nel prospetto in fig. 5.

No disgregazione	+X				-X			
	Att.	Prog.	C.Sic.	Variaz.	Att.	Prog.	C.Sic.	Variaz.
Parete 1								
Rigid. K (kN/m)	124.43	97.55	0.784	-21.6%	158.10	97.55	0.617	-38.3%
Forza max F (kN)	91.24	80.10	0.878	-12.2%	91.24	80.10	0.878	-12.2%
Spost. SLV (mm)	10.93	10.89	0.996	-0.4%	10.93	10.89	0.996	-0.4%
Spost. SLD (mm)	1.11	1.28	1.153	+15.3%	0.87	1.28	1.471	+47.1%
En. diss. (Nm)	1282.04	1112.34	0.868	-13.2%	1292.22	1112.34	0.861	-13.9%
Parete 2								
Rigid. K (kN/m)	124.43	111.07	0.893	-10.7%	158.10	111.07	0.703	-29.7%
Forza max F (kN)	91.24	256.15	2.807	>100%	91.24	256.15	2.807	>100%
Spost. SLV (mm)	10.93	11.03	1.009	+0.9%	10.93	11.03	1.009	+0.9%
Spost. SLD (mm)	1.11	7.27	6.550	>100%	0.87	7.27	8.356	>100%
En. diss. (Nm)	1282.04	2707.78	2.112	>100%	1292.22	2707.78	2.095	>100%
Parete 3								
Rigid. K (kN/m)	124.43	140.24	1.127	+12.7%	158.10	140.24	0.887	-11.3%
Forza max F (kN)	91.24	100.12	1.097	+9.7%	91.24	100.12	1.097	+9.7%
Spost. SLV (mm)	10.93	22.06	2.018	>100%	10.93	22.06	2.018	>100%
Spost. SLD (mm)	1.11	1.20	1.081	+8.1%	0.87	1.20	1.379	+37.9%
En. diss. (Nm)	1282.04	2864.70	2.234	>100%	1292.22	2864.70	2.217	>100%
Parete 4								
Rigid. K (kN/m)	124.43	142.56	1.146	+14.6%	158.10	142.56	0.902	-9.8%
Forza max F (kN)	91.24	147.04	1.612	+61.2%	91.24	147.04	1.612	+61.2%
Spost. SLV (mm)	10.93	22.06	2.018	>100%	10.93	22.06	2.018	>100%
Spost. SLD (mm)	1.11	4.70	4.234	>100%	0.87	4.70	5.402	>100%
En. diss. (Nm)	1282.04	3756.05	2.930	>100%	1292.22	3756.05	2.907	>100%
Parete 5								
Rigid. K (kN/m)	124.43	149.69	1.203	+20.3%	158.10	149.69	0.947	-5.3%
Forza max F (kN)	91.24	225.05	2.466	>100%	91.24	225.05	2.466	>100%
Spost. SLV (mm)	10.93	22.06	2.018	>100%	10.93	22.06	2.018	>100%
Spost. SLD (mm)	1.11	7.35	6.622	>100%	0.87	7.35	8.448	>100%
En. diss. (Nm)	1282.04	5704.36	4.449	>100%	1292.22	5704.36	4.414	>100%

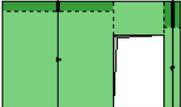
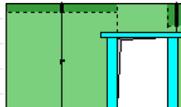
No disgregazione				
Parete 1	Attuale	Progetto	Att.:	pietrame con malta scadente
			Prog.:	pietrame con malta scadente
				verifica NON soddisfatta
Parete 2			Att.:	pietrame con malta scadente
			Prog.:	pietrame con malta scadente, telaio con montante h=300 mm
				verifica NON soddisfatta
Parete 3			Att.:	pietrame con malta scadente
			Prog.:	ristilatura non armata, architrave
				verifica soddisfatta
Parete 4			Att.:	pietrame con malta scadente
			Prog.:	ristilatura non armata, telaio con montante h=150 mm
				verifica soddisfatta
Parete 5			Att.:	pietrame con malta scadente
			Prog.:	ristilatura non armata, telaio con montante h=250 mm
				verifica non soddisfatta

Fig. 5. Ipotesi (A): risultati per diversi Stati di Progetto

(Parete 1) Dopo la modifica dell'apertura, nell'assenza (teorica) di interventi, la parete subisce un peggioramento riguardante tutti i parametri monitorati: rigidità, resistenza e capacità di spostamento. Si tratta di un ovvio risultato che mostra la necessità di intervento sulla qualità della muratura e con eventuali nuove strutture di rinforzo.

E' interessante osservare che la posizione eccentrica dell'apertura esistente determina un diverso comportamento nei due versi sismici nel piano della parete (+X e -X), a seconda che il puntone del cuneo di distacco determinato dal meccanismo sismico intercetti o meno l'apertura [6]. Allo Stato di Progetto la nuova posizione e le nuove dimensioni dell'apertura comportano un comportamento analogo nei due versi sismici.

(Parete 2) La prima proposta di consolidamento prevede un telaio di cerchiatura piuttosto robusto, con elementi a C di acciaio di spessore 10 mm., che si estendono per 300 mm. nel piano della parete, senza contemporanei interventi sulla muratura. La parete mostra una riduzione del 29.7% di rigidità per sisma - X e quindi la verifica non è soddisfatta: la variazione di rigidità accettabile definita in input è infatti compresa nell'intervallo +/-15%.

(Parete 3) Si evidenzia pertanto la necessità di intervenire anche sulla muratura: un aspetto che comunque deve essere preso in considerazione, in quanto la qualità originaria della malta è scadente, anche se non sono previsti fenomeni di possibile disgregazione grazie a un valore di IQM fuori piano maggiore di 4. L'intervento di ristilatura dei giunti non armata interessa il 50% dello spessore (15 cm) e conduce ad un aumento di rigidità e di resistenza della parete. Come primo tentativo, si evita il portale in acciaio, posizionando semplicemente un'architrave. La rigenerazione della malta appare sufficiente per garantire una verifica di riparazione locale soddisfatta. La variazione di rigidità rientra entro i limiti previsti, e la condizione di non peggioramento su forza ultima e capacità di spostamento completa la verifica. La capacità di spostamento incrementa decisamente (raddoppia): ciò deve essere considerato favorevole nei confronti della verifica.

(Parete 4) La realizzazione di un telaio, anziché della sola architrave, è tuttavia preferibile dal punto di vista del rafforzamento degli stipiti della nuova apertura. Si analizza quindi la parete con la rigenerazione della malta ed un'ipotesi di telaio che non alteri troppo la rigidità, con montanti di dimensioni 150 mm. nel piano della parete. L'esito è ancora favorevole: rispetto al caso senza telaio, la rigidità incrementa un poco, la resistenza invece incrementa in modo più significativo, mentre la capacità di spostamento resta invariata.

(Parete 5) Lo studio del progetto viene completato ipotizzando un telaio più robusto, con dimensione 250 mm. nel piano della parete. Stavolta però l'aumento di rigidità, per sisma +X, eccede il limite del 15% e quindi la verifica locale non è più soddisfatta.

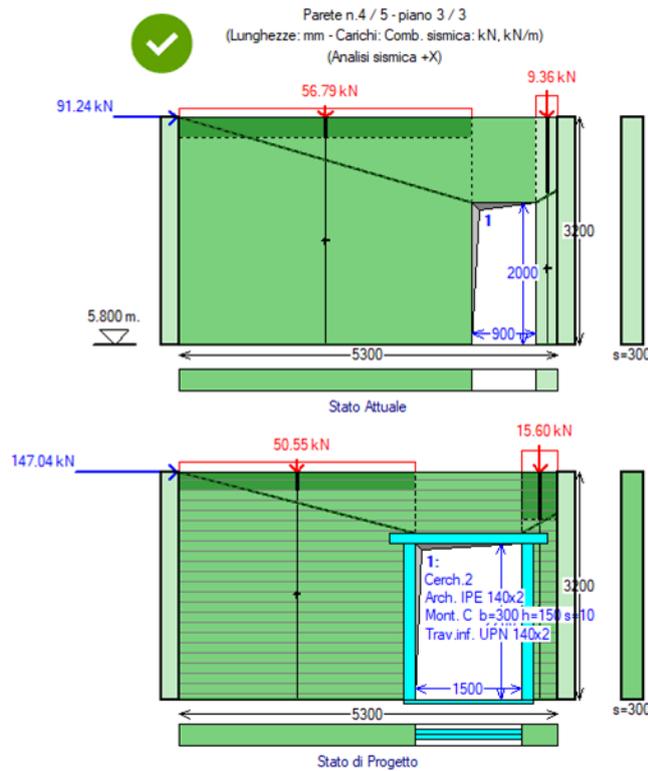
La parete 4 è la **soluzione ottimale di progetto: rigenerazione della malta con realizzazione di un telaio non troppo rigido**. I dati sui maschi murari agli Stati Attuale e di Progetto ed i risultati in dettaglio su coefficienti di sicurezza, curve di capacità e stato di sollecitazione degli elementi strutturali in corrispondenza di SLV sono riportati nelle immagini seguenti.

In fig. 6 i dati dei maschi murari contengono allo Stato di Progetto la definizione dell'intervento di consolidamento tramite ristilatura dei giunti riguardante il 50% dello spessore della parete.

Nelle figg. 7, 8 sono riportate le curve di capacità a confronto fra Stato di Progetto e Stato Attuale, con riferimento all'analisi in direzione X (nel piano della parete) nei due versi +X e -X.

In fig. 9 si rappresenta lo stato di sollecitazione delle pareti in corrispondenza di SLV.

Si osservi che nello Stato Attuale il maschio murario sul lato destro è stato considerato sismicamente non reagente in quanto corrisponde ad una mazzetta muraria di dimensione 30 cm. inferiore a 50 cm. come normalmente richiesto per sviluppare un'adeguata capacità [7]. Lo Stato di Progetto, come già accennato nella presentazione dell'esempio, prevede una mazzetta di 50 cm, che, in presenza della cerchiatura, resta parzialmente inclusa nel profilo a C utilizzato come montante del telaio.



STATO ATTUALE

N°	Edit	Sism. reag.	B (mm)	H (mm)	Zona rig. inf. (mm)	Zona rig. sup. (mm)	s (mm)	K: x in xEJ/h³	P.somm SLU (kN)	P.somm Sism (kN)	sp.o (N/mm²)	sp.v (N/mm²)	Tipol.	F.C
1	▶	...	4100	3200	0	285	300	12.0	85.19	56.79	0.00	0.00	31	1.350
2			300	3200	0	1061	300	12.0	14.04	9.36	0.00	0.00	31	1.350

N°	f.m (N/mm²)	f.hm (N/mm²)	tau.0 (N/mm²)	fv.0 (N/mm²)	fb (N/mm²)	(m) coeff. attr.	(phi) coeff.	ft (N/mm²)	E (N/mm²)	G (N/mm²)	p.s. (kN/m³)
1	▶	2.07	1.035	0.039				0.207	1268	401	20.00
2		2.07	1.035	0.039				0.207	1268	401	20.00

N°	Malta scadente	Nucleo scadente	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Diatoni artificiali	Tirantini antiespuls.	Iniezioni di miscela	Intonaco armato	Ristilatura non armata	% spessore	Ristilat. arm. con conness.
1	▶										50	
2											50	

N°	Coeff. corrett. resistenze	Coeff. corrett. mod. elast.	Rinforzo con FRCCM	Drift (%) a PressoFl. (SLC)	Drift (%) a Taglio (SLC)	PressoFl. Compl.	Taglio Scorr.	Taglio Fess. Diag.	IQM f.p. <= 4	Comport. fragile
1	▶	fm: 1.00 - tau0.fv: 1.00		1.00	0.50					
2		fm: 1.00 - tau0.fv: 1.00		1.00	0.50					

STATO DI PROGETTO

N°	Edit	Sism. reag.	B (mm)	H (mm)	Zona rig. inf. (mm)	Zona rig. sup. (mm)	s (mm)	K: x in xEJ/h³	P.somm SLU (kN)	P.somm Sism (kN)	sp.o (N/mm²)	sp.v (N/mm²)	Tipol.	F.C
1	▶	...	3300	3200	0	259	300	12.0	75.83	50.55	0.00	0.00	32	1.350
2			500	3200	0	668	300	12.0	23.40	15.60	0.00	0.00	32	1.350

N°	f.m (N/mm²)	f.hm (N/mm²)	tau.0 (N/mm²)	fv.0 (N/mm²)	fb (N/mm²)	(m) coeff. attr.	(phi) coeff.	ft (N/mm²)	E (N/mm²)	G (N/mm²)	p.s. (kN/m³)
1	▶	3.34	1.668	0.148				0.334	1916	584	20.00
2		3.34	1.668	0.148				0.334	1916	584	20.00

N°	Malta scadente	Nucleo scadente	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Diatoni artificiali	Tirantini antiespuls.	Iniezioni di miscela	Intonaco armato	Ristilatura non armata	% spessore	Ristilat. arm. con conness.
1	▶										50	
2											50	

N°	Coeff. corrett. resistenze	Coeff. corrett. mod. elast.	Rinforzo con FRCCM	Drift (%) a PressoFl. (SLC)	Drift (%) a Taglio (SLC)	PressoFl. Compl.	Taglio Scorr.	Taglio Fess. Diag.	IQM f.p. <= 4	Comport. fragile
1	▶	fm: 1.20 - tau0.fv: 1.20		1.20	0.50					
2		fm: 1.20 - tau0.fv: 1.20		1.20	0.50					

Fig. 6. Ipotesi (A): soluzione di progetto. Dati maschi murari

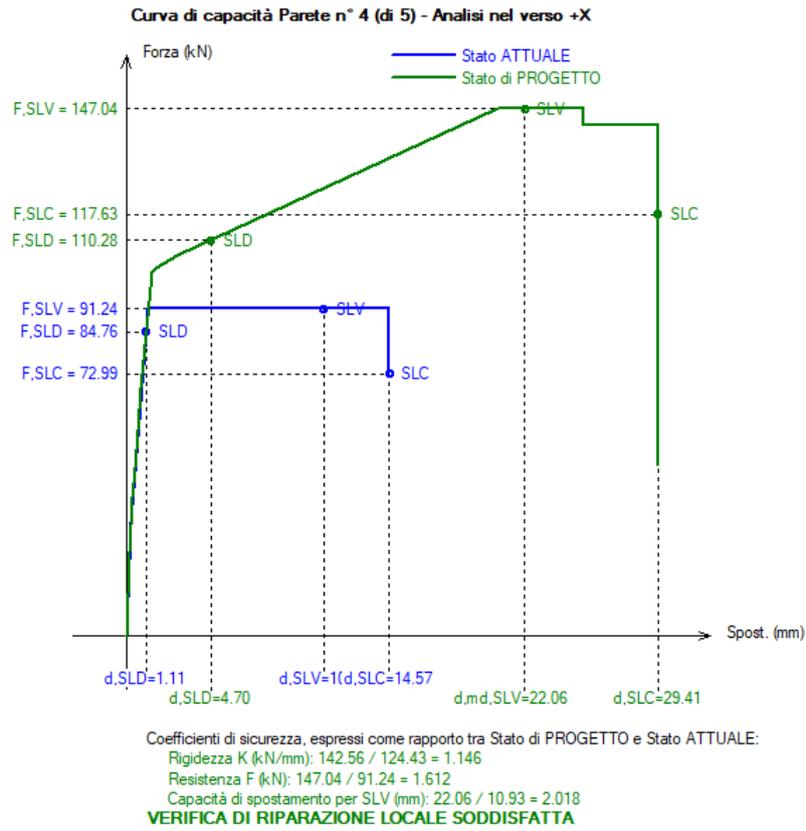


Fig. 7. Ipotesi (A): curve di capacità per analisi sismica +X

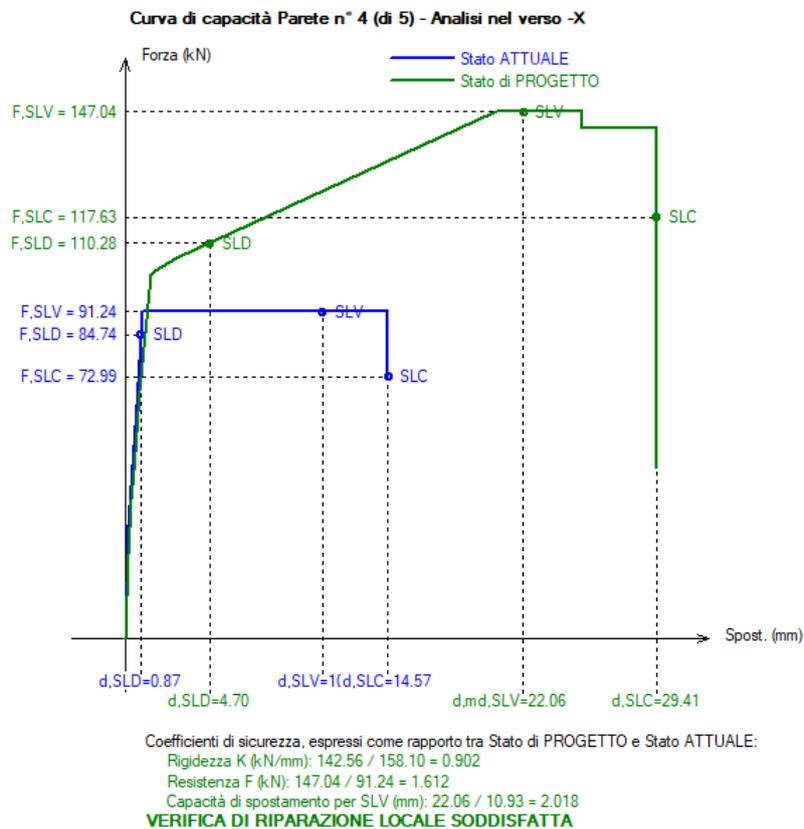


Fig. 8. Ipotesi (A): curve di capacità per analisi sismica -X

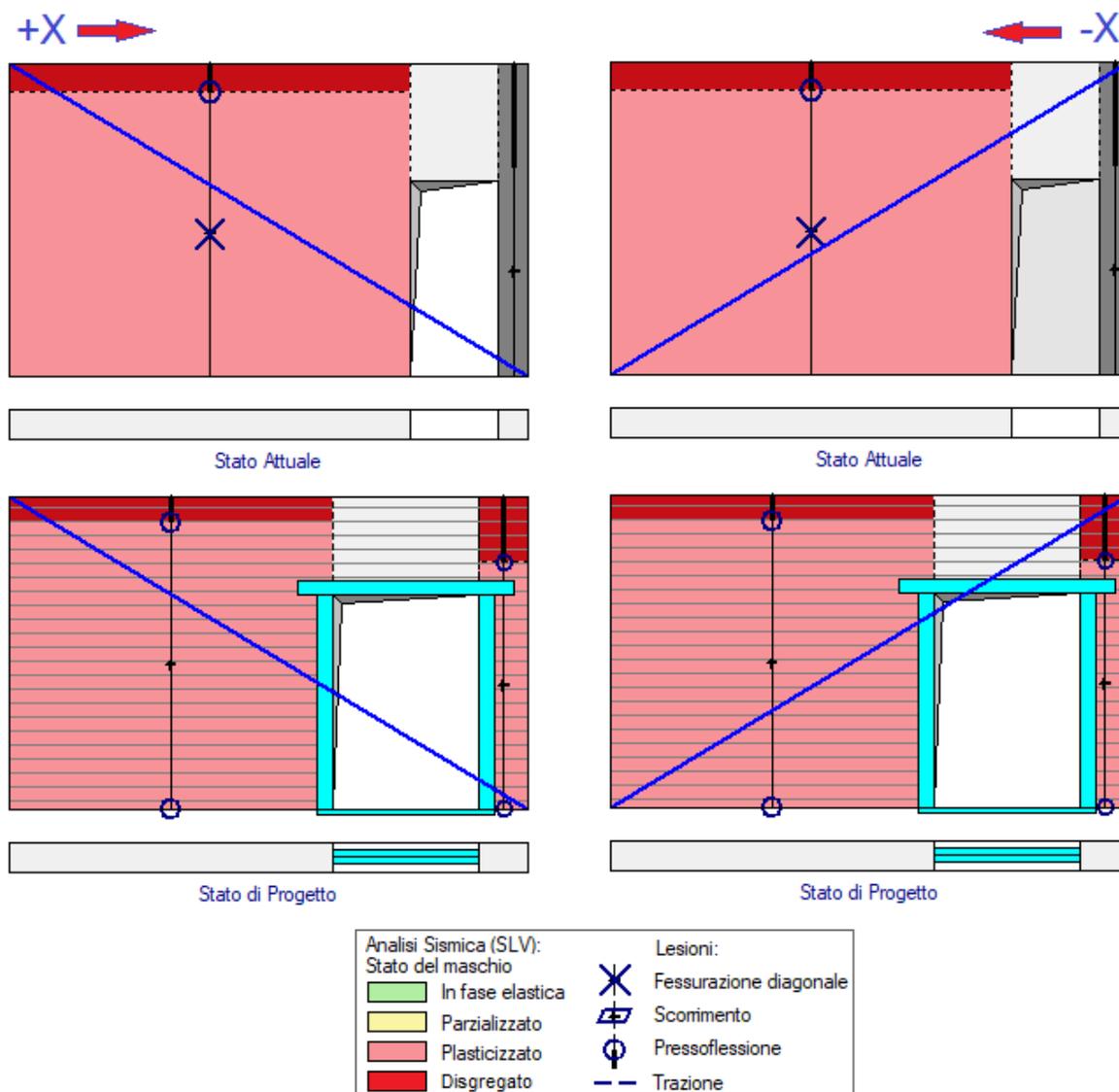


Fig. 9. Ipotesi (A): stato di sollecitazione dei maschi in corrispondenza di SLV

6. DISGREGAZIONE DELLA MURATURA: FORMULAZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO

Nell'ipotesi (B) si analizza la parete ipotizzando che nello Stato Attuale la malta scadente si accompagni all'assenza di ricorsi e di connessione trasversale: questa tipologia è soggetta a possibile disgregazione, come risulterà evidente dall'elaborazione dell'Indice di Qualità Muraria presentata al paragrafo seguente. Prima di illustrare l'analisi della parete soggetta a possibile disgregazione, è necessario formulare una metodologia di calcolo che permetta di includere la modalità di collasso per disgregazione nell'ambito dei criteri di capacità dei maschi murari.

Come accennato in precedenza, la **disgregazione è una crisi di tipo fragile** particolarmente temibile che precede l'attivazione dei cinematismi per corpi rigidi e lo sviluppo delle capacità di resistenza e di deformazione.

Per effetto della disgregazione, non vi è più coesione a causa della malta 'polverizzata'; i componenti della muratura si separano e la parete degrada nell'ammasso caotico degli elementi lapidei che la costituiscono.



Fig. 10. Disgregazione di un edificio in muratura (da [3])

La fig. 10 mostra un esempio di disgregazione. Come specificato in [3], si tratta di un "edificio in Accumoli (RI) con sistematico utilizzo di elementi lavorati e numerose pietre di media e grande dimensione che interessano gran parte dello spessore del muro, conferendo un certo grado di ingranamento trasversale. L'ingranamento viene meno all'ultimo livello, dove i paramenti sembrano nettamente scollegati. La muratura di questo edificio è in conci sbazzati senza ricorsi e con ingranamento trasversale per la parte inferiore e in conci sbazzati senza ricorsi e privi ingranamento trasversale per la parte superiore. L'edificio, nel sisma del 2016, si è disgregato solo nella parte superiore. A tal proposito, si ricorda quanto scritto in precedenza relativamente ai fattori (oltre alla cattiva qualità muraria) che predispongono alla disgregazione".

Nelle immagini di fig. 11 sono ben evidenziati gli effetti disgregativi prodotti dagli eventi sismici: a terra non sono presenti parti strutturali di murature intere, identificabili, ma solo macerie di elementi murari originari: pietre, laterizi e malte polverizzate [8].



Effetti del sisma a Pescara del Tronto



Effetti del sisma ad Accumoli e Castelluccio di Norcia

Fig. 11. Effetti disagregativi dovuti agli eventi sismici in Italia Centrale, 2016 (da [8])

Per comprendere il ruolo della qualità muraria nel processo di disagregazione, è utile riportare un estratto dal lavoro di riferimento [3], cui si rimanda per dettagli e approfondimenti.

“I fattori maggiormente significativi nel favorire fenomeni disagregativi sono apparsi: malta di pessima qualità ed assenza di connessione trasversale fra i paramenti. Quando erano presenti entrambe queste situazioni si è assistito spesso a crolli per disagregazione. Quando invece era presente una sola di queste situazioni allora il comportamento è sembrato dipendere, tipologia per tipologia, da altri fattori, come qualità della malta e/o presenza di ricorsi orizzontali.

Le murature che sono apparse maggiormente soggette a disagregazione sono state quelle con tessitura irregolare, in particolare quella in pietrame disordinato e quella in pietra tenera o tufo a conci irregolari. Hanno avuto comportamenti migliori (in genere non disagregativi) le murature dotate di orizzontalità dei filari, di connessione trasversale e di malta di qualità buona.

Le murature in conci sbozzati e quelle in pietra a spacco, così come quelle in elementi di tufo regolari, hanno avuto comportamenti migliori nel contrastare la disagregazione, specie nei casi di connessione trasversale e buona qualità della malta.

Le murature in blocchi lapidei squadrati e quelle in mattoni semipieni con malta cementizia in genere non hanno presentato fenomeni disagregativi.

Le murature in mattoni con malta a base calce hanno manifestato, in generale, un buon comportamento, con l'esclusione del caso in cui avevano malta pessima e assenza di ingranamento trasversale.

Quanto sopra trova riscontro nella figura seguente (fig. 12), dove sono riportati, per ciascuna tipologia muraria, i valori dell'indice IQM fuori piano (IQMfp); le tipologie murarie sono distinte in base alla tessitura regolare/irregolare, alla presenza/assenza di ingranamento trasversale e alla presenza/assenza di malta di pessima qualità. In tale figura è evidenziato, con una linea rossa, il valore $IQMfp = 4$.

Come si può notare, le tipologie murarie aventi le carenze prima descritte (essenzialmente, murature irregolari prive di connessione o regolari prive di connessione e malta pessima) stanno quasi tutte sotto a tale linea. Peraltro, valori inferiori a 4 derivano da gravi mancanze nel rispetto delle regole dell'arte; per esse appare quindi probabile la perdita di monoliticità per effetto di azioni sismiche.

Viceversa, murature, sia irregolari che regolari, ma con connessione trasversale e malta non pessima, hanno quasi sempre valori di IQMfp maggiori di 4."

In fig. 12 sono evidenziate 12 tipologie di muratura a conci sbozzati, con presenza o assenza di connessioni e/o ricorsi e con varie qualità di malta (scadente [caratterizzata dal correttivo per malta di pessima qualità], modesta [corrispondente alla malta considerata per la Tab.C8.5.I], buona [caratterizzata dal coefficiente correttivo di Tab.C8.5.II applicato al valore base di Tab C8.5.I]).

Le frecce rosse evidenziano le 6 tipologie per le quali IQM fuori piano indica la possibile disgregazione; le frecce verdi tutte le altre.

Un quadro riassuntivo delle tipologie di muratura a conci sbozzati è riportato anche in fig. 13, dove sono elencate le 12 tipologie. La n°1 corrisponde alla muratura del modello dell'esempio analizzato nel presente lavoro soggetta a possibile disgregazione (assenza di connessioni e di ricorsi), i cui risultati verranno esaminati nel paragrafo seguente. La n°7 corrisponde invece alla muratura non soggetta a disgregazione, in quanto pur caratterizzata da malta scadente presenta ricorsi e connessioni; questo caso è stato trattato nei paragrafi precedenti.

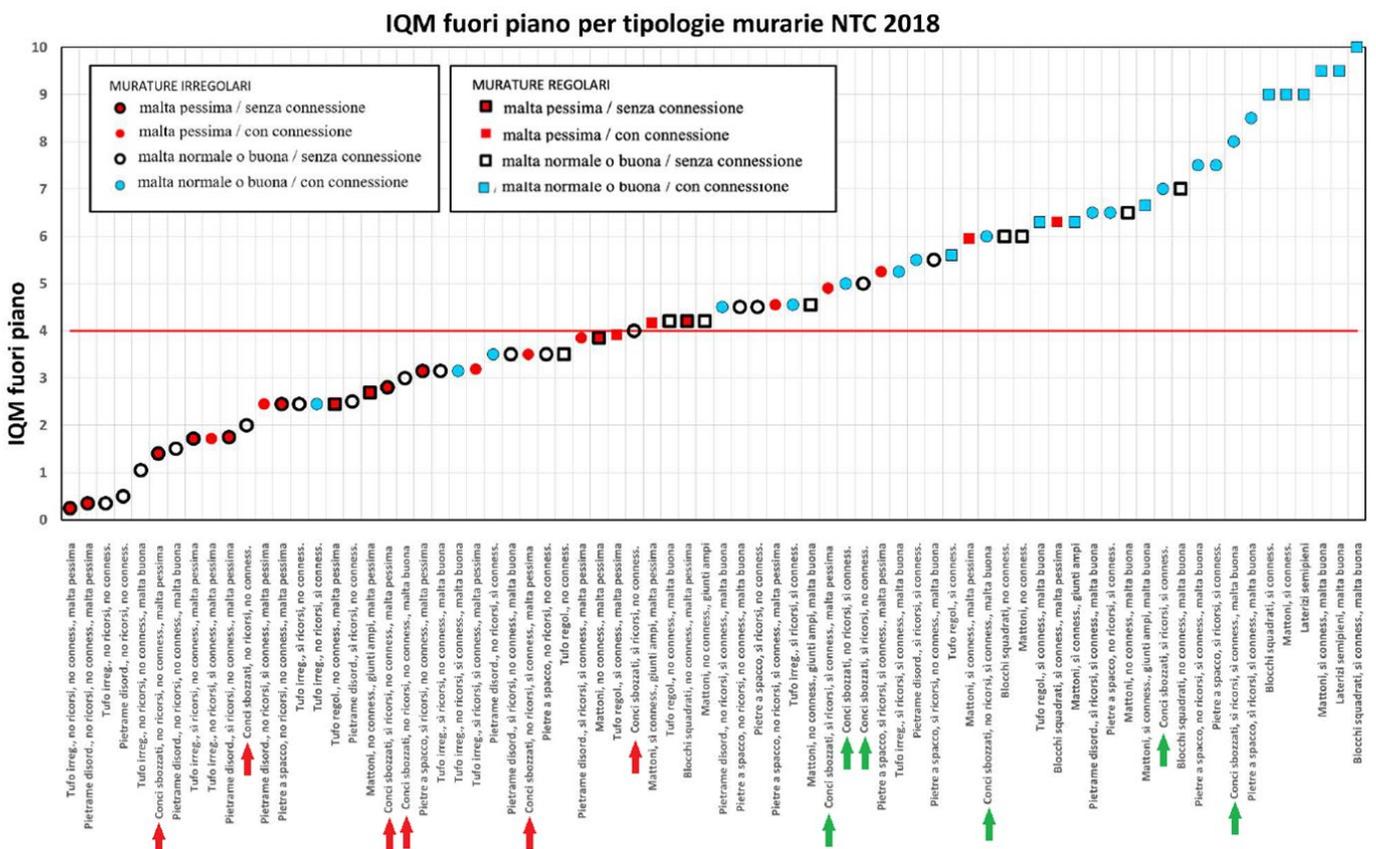


Fig. 12. IQM fuori piano per le murature di Normativa. In evidenza, le tipologie di muratura a conci sbozzati (rielaborazione da [3])

Indice IQM fuori piano per muratura contemplata nella Normativa: muratura a conci sbozzati

ID tipologia	Ricorsi o listature	Connessioni trasversali	Malta			IQM fuori piano [^]	Pareti di esempio	IQM f.p.
			pessima*	modesta**	buona***			
1			x			1.5	disgregaz.	1.05
2				x		2.0		
3	x		x			2.8		
4					x	3.0		
5		x	x			3.5		
6	x			x		4.0		
7	x	x	x			4.8	No disgreg.	4.55
8		x		x		5.0		
9	x				x	5.0		
10		x			x	6.0		
11	x	x		x		7.0		
12	x	x			x	8.0		

*pessima: corrisponde all'applicazione del correttivo peggiorativo alla malta di Tab.C8.5.I, secondo §C8.5.3.1

**modesta: corrisponde alla Tab.C8.5.I

***buona: corrisponde all'applicazione del correttivo alla malta di Tab.C8.5.I secondo la Tab.C8.5.II

[^] valori indicativi di soglia per IQM fuori piano. Le murature di esempio sono riportate sul lato destro

Fig. 13. IQM fuori piano per la muratura a conci sbozzati. In evidenza, i due casi delle pareti di esempio

Le pareti in muratura vengono modellate, secondo la Normativa vigente, come pannelli dotati di capacità resistenti a taglio e a pressoflessione, e caratterizzati da una capacità di spostamento valutata in base alla deformazione angolare (drift), il cui valore dipende dalla modalità di crisi. Il comportamento meccanico del pannello murario viene descritto da una curva elasto-plastica, dove il tratto plastico rappresenta la deformazione progressiva sotto sforzo costante (lo sforzo corrispondente al raggiungimento del limite elastico), fino al massimo spostamento di progetto. La duttilità del maschio murario è quindi definita dal tratto orizzontale (plastico) del diagramma.

Quando la muratura è soggetta a disgregazione, vengono a mancare le risorse di duttilità e **il modello elasto-plastico degrada in elasto-fragile** (fig. 14). L'annullamento del tratto plastico è coerente con la Normativa, che in §C8.7.1 indica l'opportunità di "riconoscere e analizzare, per quanto possibile, tutte le criticità locali (anche quelle difficilmente quantificabili) che possano determinare situazioni di fragilità e rotture rovinose in occasione di scuotimenti".

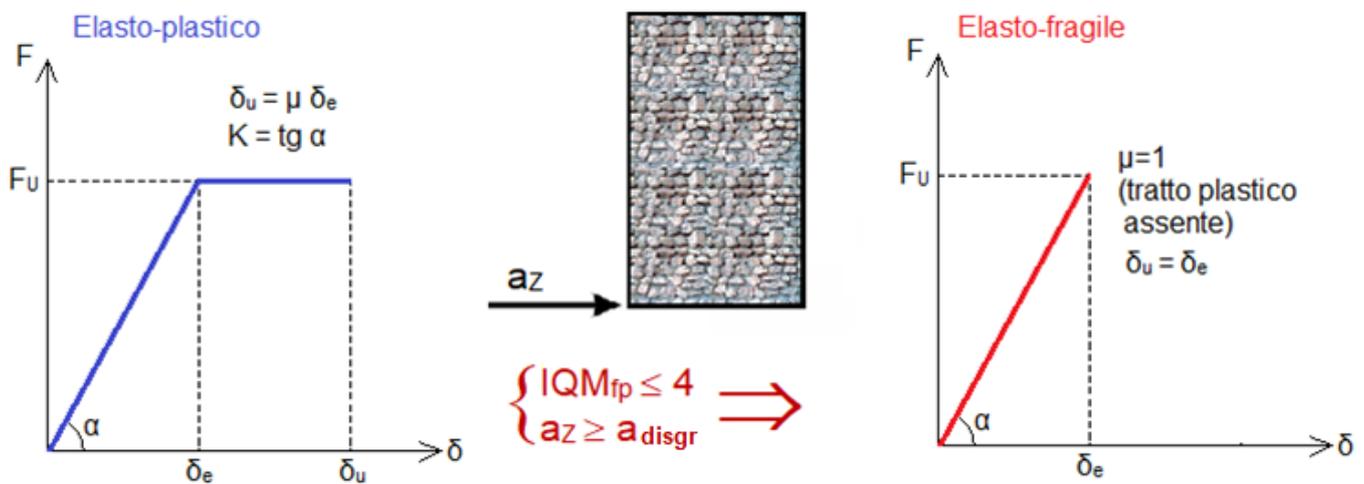


Fig. 14. Muratura soggetta a disgregazione: modello elasto-fragile

Si potrebbe osservare che ad una parete muraria portante soggetta a possibile disgregazione manca la dignità di elemento strutturale, e quindi ogni modello di comportamento rappresentativo fondato su parametri meccanici non appare idoneo. Ciò corrisponde allo scuotimento sismico nella fase di maggiore intensità, ma prima di giungere a tale eccitazione la parete ha comunque una pur piccola capacità resistente, che ne giustifica l'assetto statico e l'equilibrio mantenuto sotto azioni sismiche di bassa entità.

Pertanto, un diagramma di comportamento di tipo elasto-fragile² ben rappresenta la capacità iniziale della parete, capacità che, all'aumentare della sollecitazione, ad un certo punto viene a mancare improvvisamente per effetto della disgregazione. **A quel punto l'elemento strutturale cessa di fatto di esistere e da solido resistente si trasforma in ammasso caotico di elementi lapidei.** Il grado di sollecitazione che segna la crisi può essere identificato col limite elastico della parete, annullando a causa della disgregazione ogni capacità plastica³.

² E' interessante osservare quanto espresso in un documento per la ricostruzione post sisma 2016 [9]:
Come primo punto occorre considerare la capacità o meno della tipologia muraria dell'edificio in esame di avere un comportamento strutturale vero e proprio. Infatti, nel caso in cui la muratura tenda a disgregarsi e decomporsi sotto azioni cicliche ripetute, viene vanificato qualsiasi tipo di intervento che non sia capace anche di ostacolare tale disgregazione; in queste situazioni perdono significato sia i valori delle caratteristiche di resistenza e deformabilità di cui alle normative, sia i metodi di analisi ivi previsti.

Da una prima lettura del testo citato, si potrebbe ritenere che ogni tipo di modellazione di un maschio murario soggetto a possibile disgregazione sia privo di significato. Ma risulta evidente che la perdita di dignità strutturale interessa la fase intensa dell'evento sismico.

Per la caratterizzazione di un diagramma di comportamento idoneo per un muro soggetto a possibile disgregazione, si può osservare che la classificazione della muratura tramite il metodo IQM fornisce parametri meccanici (resistenze a compressione e taglio, moduli elastici), coerenti con le indicazioni normative, anche per murature scadenti che presentano un valore dell'indice fuori piano ≤ 4 e che quindi sono soggette a disgregazione. Dunque, anche il comportamento dei maschi con tale tipo di murature può essere rappresentato tramite un tratto elastico (caratterizzato dalla rigidità definita dai moduli di elasticità, oltre che dalla geometria e dai vincoli) con punto di crisi segnato dal raggiungimento della resistenza per pressoflessione e/o taglio. Ciò che caratterizza la tendenza alla disgregazione è la rimozione del tratto plastico, corrispondente appunto alla fase sismica durante la quale l'elemento perde la dignità strutturale.

³ Le murature soggette a disgregazione sono murature storiche, tipicamente in pietrame, costituite da elementi lapidei collegati da malte di scarsa qualità e da due paramenti. La disgregazione è un fenomeno che avviene sia nel piano dei due paramenti, attraverso la disconnessione fra elementi lapidei e malta, sia nel piano ad esso ortogonale, mediante allontanamento reciproco dei paramenti.

Il meccanismo disgregativo viene determinato da un'azione combinata di accelerazioni orizzontali, orientate nei due piani suddetti, e verticali. Riconoscendo nel fenomeno della disgregazione un'evoluzione infausta di un meccanismo locale, con espulsione del materiale fuori piano per effetto delle azioni inerziali, gli Autori del metodo IQM hanno identificato come discriminante il valore dell'indice IQM fuori piano [3].

Il fatto che nel fenomeno della disgregazione siano coinvolte tutte le componenti dell'azione sismica (nel piano, fuori piano e verticale) autorizza, nell'ambito delle verifiche svolte considerando il comportamento nel piano (quali quelle tipiche degli interventi locali), la schematizzazione di un comportamento di tipo elasto-fragile.

Sul ruolo delle oscillazioni verticali sono in corso studi (Mariani, Pugi) per identificare la relazione fra contenuto sismico ad alta frequenza e innesco del fenomeno disgregativo.

La caratterizzazione completa del fenomeno della disgregazione richiede ulteriori considerazioni.

Come specificato dagli Autori del metodo IQM [3], **la scarsa qualità identificata con IQM fuori piano ≤ 4 è una condizione necessaria per la disgregazione, ma affinché il fenomeno si manifesti occorre un'accelerazione sismica di intensità sufficientemente elevata.**

La soglia di accelerazione sismica oltre la quale si può innescare il fenomeno disgregativo è argomento tuttora in corso di studio; è comunque possibile attribuire a tale soglia un valore plausibile che ad esempio può considerarsi non inferiore a 0.200-0.300 g⁴. In fig. 14 la soglia è indicata con il simbolo a_{disgr} .

⁴ Un'altra condizione favorevole per il fenomeno è che la parete sia esterna: il minor vincolamento della parete con le strutture adiacenti, ossia la sua maggiore libertà di movimento, facilita il distacco del materiale. Questa condizione, presente evidentemente solo in alcuni casi, può essere caratterizzata nelle valutazioni analitiche abbassando la soglia di accelerazione sismica che innesca la possibile disgregazione. In un software di calcolo è necessario che il valore di tale soglia sia modificabile in base al grado di sicurezza che si desidera raggiungere.

A partire dai valori al suolo indicati da PGA, l'accelerazione subisce un'amplificazione lungo l'elevazione dell'edificio. L'accelerazione sismica che investe un elemento strutturale dipende dalla quota dell'elemento (ad esempio, per una parete in muratura la quota di base della parete, ossia quella del piano a cui è ubicata) e dalle caratteristiche dinamiche dell'edificio. Grazie alla formulazione degli spettri di piano (§C7.2.3) è possibile definire un'accelerazione di ancoraggio alla quota Z (a_z) che investe una data parete in base alla sua posizione, alle proprietà dinamiche della struttura e al sito di ubicazione:

$$a_z = S_e(T, \xi) \cdot \gamma \cdot \psi(Z) \cdot \sqrt{1 + 0.0004 \xi^2}$$

dove, con riferimento al modo di vibrare fondamentale dell'edificio:

$S_e(T, \xi)$ = spettro di risposta elastico fornito dal modo fondamentale dell'edificio avente periodo T, con ξ smorzamento viscoso equivalente (espresso in unità percentuali: ad es. 5%); T può essere stimato con la [C7.3.2]: $T = C_1 \cdot H^{3/4}$, con $C_1 = 0.050$ per costruzioni in muratura e H altezza dell'edificio in metri (T in sec.);

γ = coefficiente di partecipazione modale, che può essere espresso con la [C7.2.10]:

$\gamma = 3n / (2n+1)$ con n=numero di piani dell'edificio;

$\psi(Z) = Z/H$ = è il valore della forma modale alla quota Z.

La verifica di sicurezza locale per una parete muraria di qualità scadente soggetta a possibile disgregazione terrà conto quindi dell'accelerazione strutturale che investe la parete in base alla sua posizione in elevazione e alle proprietà dinamiche dell'edificio.

La posizione in quota è un aspetto rilevante nei confronti della possibile disgregazione: la fig. 10 mostra un caso dove la disgregazione si è manifestata in una parete dell'ultimo piano, laddove l'accelerazione assume i valori più elevati.

Nel caso di esempio: la quota di base della parete è 5.80 m., l'edificio, di 3 piani, è alto 9 m., i parametri sismici corrispondenti a SLV sono i seguenti: $T_B = 0.134$ sec, $T_C = 0.403$ sec, $F_0 = 2.527$, $ag \cdot S = 0.151$ g.

L'accelerazione strutturale alla quota di base della parete è pari a:

$$T = 0.050 \cdot 9.00^{3/4} = 0.260 \text{ sec}, T_B < T < T_C$$

$$\xi = 5\%, \gamma = 1.286, \psi(Z) = 5.80/9.00 = 0.644$$

$$S_e(T, \xi) = ag \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 = 0.151 \cdot 1 \cdot 2.527 = 0.382 \text{ g}$$

da cui risulta un'accelerazione alla base della parete pari a:

$$a_z = 0.151 \cdot 1.286 \cdot 0.644 \cdot 1.005 = 0.318 \text{ g}$$

valore che può considerarsi sufficientemente elevato per innescare fenomeni di disgregazione su pareti in muratura di bassa qualità (identificate da un valore di IQM fuori piano ≤ 4).

Nel paragrafo seguente viene ripresa l'analisi della parete, considerando la muratura originaria soggetta a possibile disgregazione. In tal caso, **la necessaria riqualificazione della muratura conferirà alla parete una duttilità originariamente assente**. Nelle verifiche di sicurezza, l'evoluzione del comportamento da fragile a duttile influirà sul confronto fra Stato di Progetto e Stato Attuale.

7. IPOTESI (B): MURATURA SCADENTE SOGGETTA A POSSIBILE DISGREGAZIONE

Nell'ipotesi (B) la malta risulta scadente e nella parete non sono presenti filari orizzontali né diatoni in grado di assicurare una connessione trasversale fra i due paramenti murari. La scheda di analisi della parete con l'app IQMindex [4] ha prodotto i risultati di seguito riportati.

Parametri della regola dell'arte:

P.D.=NR, MA.=NR, F.EL.=PR, S.G.=NR, RE.EL.=R, OR.=NR, D.EL.=PR

con applicazione del correttivo per malta di pessima qualità

(in rosso i parametri differenti rispetto alla muratura dell'ipotesi (A))

Risultati per i punteggi di IQM: Azioni Verticali: 1.4, Azioni Fuori Piano: 1.05, Azioni Nel Piano: 1.05.

IQM fuori piano risulta < 4. Secondo la formulazione del metodo IQM, **la muratura in esame è soggetta a disgregazione qualora l'accelerazione strutturale superi la soglia che può innescare il fenomeno:**

nell'esempio, alla base della parete si ha - come rilevato al paragrafo precedente - $a_z=0.318$ g, valore considerato superiore alla soglia di disgregazione; il modello di comportamento dei maschi murari allo Stato Attuale è pertanto da considerarsi di tipo elasto-fragile. La duttilità verrà implementata nello Stato di Progetto grazie alla rigenerazione della malta.

Risultati per i parametri meccanici:

(N/mm ²)	min	med	max
f_m	1.38	1.86	2.33
τ_0	0.023	0.029	0.036
E	756	918	1079
G	247	298	348

In grassetto sono riportati i valori da utilizzare per la modellazione strutturale dello Stato Attuale della parete, ossia i valori minimi per le resistenze e medi per i moduli elastici, in corrispondenza del livello di conoscenza LC1.

Analogamente all'ipotesi (A), per lo Stato di Progetto gli interventi di consolidamento dovranno prevedere una rigenerazione della malta che la porti dall'iniziale pessima qualità a condizioni buone, applicando i coefficienti correttivi amplificativi alle condizioni 'standard' ossia alla muratura valutata senza il correttivo penalizzante per malta di pessima qualità.

La scheda IQM elaborata per la muratura già esaminata ma senza correttivo per malta di pessima qualità conduce ai valori degli indici ed i parametri meccanici qui di seguito riportati.

(N/mm ²)	min	med	max
f_m	1.55	2.07	2.59
τ_0	0.026	0.034	0.042
E	830	1007	1183
G	263	317	371

La parete nell'ipotesi (B) viene analizzata con il software Aedes.ACM [5], con modalità analoghe all'ipotesi (A) sia per le impostazioni dei parametri meccanici dei maschi murari, sia per le ipotesi di progetto considerate.

8. IPOTESI (B): STATI DI PROGETTO CON RIGENERAZIONE DELLA MALTA E RINFORZI IN ACCIAIO

I risultati dell'analisi sono riportati nel prospetto in fig. 15. Solo la Parete 5, con muratura rigenerata tramite ristilatura non armata e telaio con profili a C di dimensione 250 mm. nel piano della parete, mostra verifica soddisfatta. Si osservi che la configurazione di progetto della parete 5 non era accettabile per l'ipotesi (A) a causa di un eccessivo incremento di rigidità, mentre diviene la soluzione ottimale per l'ipotesi (B) (in

assenza di ricorsi e di connessioni trasversali).

E' importante rilevare la variazione del comportamento della parete nel passaggio dallo schema elasto-fragile dello Stato Attuale, dove i maschi murari sono soggetti a disgregazione, a quello elasto-plastico dello Stato di Progetto laddove la muratura viene rigenerata (Pareti 3, 4, 5): la capacità di spostamento allo stato limite ultimo aumenta di molto, a causa dell'implementazione della duttilità originariamente assente.

Ne deriva un confronto fra Stato di Progetto e Stato Attuale che in termini di capacità di spostamento fornisce un rapporto (coefficiente di sicurezza) $\gg 1$ (evidenziato in colore rosa nella tabella in fig. 15).

Per includere l'intervento nell'ambito della riparazione locale è necessario considerare come favorevole la duttilità conseguita, indipendentemente dalla quantificazione di un 'rapporto' rispetto al valore originario (rapporto che viene valutato in altri casi di interventi locali al fine di 'contenere' entro un certo limite prefissato la variazione di capacità di spostamento fra Stato di Progetto e Stato Attuale).

Nel caso di una muratura soggetta a possibile disgregazione, la duttilità raggiunta va considerata non come variazione rispetto allo stato di fatto, ma come implementazione di una proprietà originariamente assente.

Comportamento fragile (disgregaz.)	+X				-X			
	Att.	Prog.	C.Sic.	Variaz.	Att.	Prog.	C.Sic.	Variaz.
Parete 1								
Rigid. K (kN/m)	92.18	72.13	0.782	-21.8%	117.27	72.13	0.615	-38.5%
Forza max F (kN)	64.98	56.00	0.862	-13.8%	64.98	56.00	0.862	-13.8%
Spost. SLV (mm)	1.07	1.21	1.13	+13.1%	0.84	1.21	1.440	+44.0%
Spost. SLD (mm)	1.07	1.21	1.132	+13.2%	0.84	1.21	1.440	+44.0%
En. diss. (Nm)	40.45	39.19	0.969	-3.1%	31.79	39.19	1.233	+23.3%
Parete 2								
Rigid. K (kN/m)	92.18	86.16	0.935	-6.5%	117.27	86.16	0.735	-26.5%
Forza max F (kN)	64.98	79.22	1.219	+21.9%	64.98	79.22	1.219	+21.9%
Spost. SLV (mm)	1.07	1.24	1.159	+15.9%	0.84	1.24	1.476	+47.6%
Spost. SLD (mm)	1.07	1.24	1.157	+15.7%	0.84	1.24	1.473	+47.3%
En. diss. (Nm)	40.45	51.47	1.273	+27.3%	31.79	51.47	1.619	+61.9%
Parete 3								
Rigid. K (kN/m)	92.18	90.74	0.984	-1.6%	117.27	90.74	0.774	-22.6%
Forza max F (kN)	64.98	69.48	1.069	+6.9%	64.98	69.48	1.069	+6.9%
Spost. SLV (mm)	1.07	11.03	>>1	>100%	0.84	11.03	>>1	>100%
Spost. SLD (mm)	1.07	1.15	1.076	+7.6%	0.84	1.15	1.369	+36.9%
En. diss. (Nm)	40.45	981.47	>>1	>100%	31.79	981.47	>>1	>100%
Parete 4								
Rigid. K (kN/m)	92.18	93.06	1.010	+1.0%	117.27	93.06	0.794	-20.6%
Forza max F (kN)	64.98	103.34	1.590	+59.0%	64.98	103.34	1.590	+59.0%
Spost. SLV (mm)	1.07	11.03	>>1	>100%	0.84	11.03	>>1	>100%
Spost. SLD (mm)	1.07	3.63	3.396	>100%	0.84	3.63	4.321	>100%
En. diss. (Nm)	40.45	1228.82	>>1	>100%	31.79	1228.82	>>1	>100%
Parete 5								
Rigid. K (kN/m)	92.18	100.19	1.087	+8.7%	117.27	100.19	0.854	-14.6%
Forza max F (kN)	64.98	194.90	2.999	>100%	64.98	194.90	2.999	>100%
Spost. SLV (mm)	1.07	11.03	>>1	>100%	0.84	11.03	>>1	>100%
Spost. SLD (mm)	1.07	8.14	7.616	>100%	0.84	8.14	9.690	>100%
En. diss. (Nm)	40.45	1990.37	>>1	>100%	31.79	1990.37	>>1	>100%

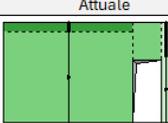
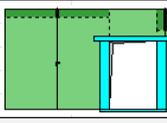
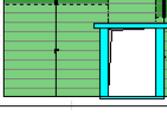
Comportamento fragile (disgregaz.)				
Parete 1	Attuale	Progetto	Att.:	pietrame con malta scadente, fragile
			Prog.:	pietrame con malta scadente, fragile
				verifica NON soddisfatta
Parete 2			Att.:	pietrame con malta scadente, fragile
			Prog.:	pietrame con malta scadente, telaio con montante h=300 mm
				verifica NON soddisfatta
Parete 3			Att.:	pietrame con malta scadente, fragile
			Prog.:	ristilatura non armata, architrave
				verifica NON soddisfatta
Parete 4			Att.:	pietrame con malta scadente, fragile
			Prog.:	ristilatura non armata, telaio con montante h=150 mm
				verifica NON soddisfatta
Parete 5			Att.:	pietrame con malta scadente, fragile
			Prog.:	ristilatura non armata, telaio con montante h=250 mm
				verifica soddisfatta

Fig. 15. Ipotesi (B): risultati per diversi Stati di Progetto

Per questi tipi di consolidamento, la verifica di intervento locale si riterrà soddisfatta se lo Stato di Progetto mostra rispetto allo Stato Attuale una **variazione in aumento delle capacità di deformazione**, senza imporre che tale aumento sia delimitato da un valore massimo. Questa considerazione si può estendere

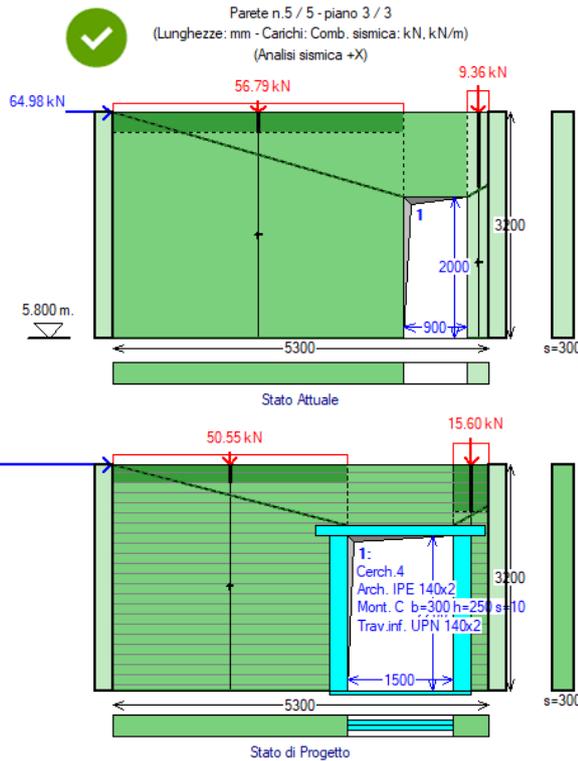
anche alla resistenza; in generale, infatti, l'indicazione normativa in §C8.4.1 secondo cui l'intervento locale non deve modificare significativamente rigidità, resistenza nei confronti delle azioni orizzontali e capacità di deformazione della struttura, si può intendere nel senso di evitare squilibri di rigidità (che richiederebbero valutazioni estese al resto dell'edificio) e peggioramenti di resistenza e capacità deformativa; questa osservazione assume particolare rilievo per le murature originariamente di bassa qualità per le quali la rigenerazione allo Stato di Progetto diviene imprescindibile.

Vengono in seguito riportati, nelle figg. 16,17,18,19, i dati e i risultati relativi alla parete 5.

In fig. 16 i dati dei maschi murari contengono allo Stato Attuale la qualifica di IQM fuori piano ≤ 4 ed inoltre, essendo l'accelerazione alla base della parete superiore alla soglia definita per la disgregazione, viene assegnato ai maschi un comportamento di tipo fragile, con assenza di duttilità.

Nelle figg. 17, 18 sono riportate le curve di capacità a confronto fra Stato di Progetto e Stato Attuale, con riferimento all'analisi in direzione X (nel piano della parete) nei due versi +X e -X.

In fig. 19 si rappresenta lo stato di sollecitazione delle pareti in corrispondenza di SLV.



lunghezza B =	5300	spessore s =	300
altezza iniz. (sx) Hi =	3200	finale (dx) Hf =	3200
colmo: dist. (da sx) =	0	altezza =	3200
Piano della parete (1 = impostata sulle fondazioni) =	3	H edificio = 9.00 m =>	
Quota di base Z =	5800	Quota di base max: 5800 mm	
Posizione e orientamento della parete:	<input checked="" type="checkbox"/> interna	<input checked="" type="checkbox"/> in dir. X	
Spessore pareti trasversali:	a sx = 250	a dx = 250	
Acc. sismica alla quota di base a.z (g) =	0.318 > 0.200 (confronto con soglia di disagregazione)		

Indice di Qualità Muraria fuori piano ≤ 4
Accelerazione sismica alla base della parete: $a_z = 0.318 \text{ g}$
 \Rightarrow Comportamento fragile

STATO ATTUALE

N°	Edit	Sism. reag.	B (mm)	H (mm)	Zona rig. inf. (mm)	Zona rig. sup. (mm)	s (mm)	K: x in xEJ/h³	P.somm SLU (kN)	P.somm Sism (kN)	sp.o (N/mm²)	sp.v (N/mm²)	Tipol.	F.C
1	▶	...	4100	3200	0	285	300	12.0	85.19	56.79	0.00	0.00	33	1.350
2	▶	...	300	3200	0	1061	300	12.0	14.04	9.36	0.00	0.00	33	1.350

N°	f.m (N/mm²)	f.hm (N/mm²)	tau.0 (N/mm²)	fv.0 (N/mm²)	fb (N/mm²)	(m) coeff. atr.	(phi) coeff.	ft (N/mm²)	E (N/mm²)	G (N/mm²)	p.s. (kN/m³)
1	1.38	0.690	0.023					0.138	918	298	20.00
2	1.38	0.690	0.023					0.138	918	298	20.00

N°	Malta scadente	Nucleo scadente	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Diatoni artificiali	Tirantini antiespuls.	Iniezioni di miscele	Intonaco armato	Ristilatura non armata	% spessore	Ristilat.arm. con conness.
1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	50	☐
2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	50	☐

N°	Coeff.corrett. resistenze		Coeff.corrett. mod.elast.	Rinforzo con FRCM	Drift (%) a PressoFl. (SLC)	Drift (%) a Taglio (SLC)	PressoFl. Compl.	Taglio Scorr.	Taglio Fess.Diag.	IQM f.p. <= 4	Comport. fragile
1	fm: 1.00 - tau0.fv0: 1.00		1.00	☐	1.00	0.50	☑	☐	☑	☑	☑
2	fm: 1.00 - tau0.fv0: 1.00		1.00	☐	1.00	0.50	☑	☐	☑	☑	☑

STATO DI PROGETTO

N°	Edit	Sism. reag.	B (mm)	H (mm)	Zona rig. inf. (mm)	Zona rig. sup. (mm)	s (mm)	K: x in xEJ/h³	P.somm SLU (kN)	P.somm Sism (kN)	sp.o (N/mm²)	sp.v (N/mm²)	Tipol.	F.C
1	▶	...	3300	3200	0	259	300	12.0	75.83	50.55	0.00	0.00	34	1.350
2	▶	...	500	3200	0	668	300	12.0	23.40	15.60	0.00	0.00	34	1.350

N°	f.m (N/mm²)	f.hm (N/mm²)	tau.0 (N/mm²)	fv.0 (N/mm²)	fb (N/mm²)	(m) coeff. atr.	(phi) coeff.	ft (N/mm²)	E (N/mm²)	G (N/mm²)	p.s. (kN/m³)
1	1.86	0.930	0.031					0.186	1208	380	20.00
2	1.86	0.930	0.031					0.186	1208	380	20.00

N°	Malta scadente	Nucleo scadente	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Diatoni artificiali	Tirantini antiespuls.	Iniezioni di miscele	Intonaco armato	Ristilatura non armata	% spessore	Ristilat.arm. con conness.
1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	50	☐
2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	50	☐

N°	Coeff.corrett. resistenze		Coeff.corrett. mod.elast.	Rinforzo con FRCM	Drift (%) a PressoFl. (SLC)	Drift (%) a Taglio (SLC)	PressoFl. Compl.	Taglio Scorr.	Taglio Fess.Diag.	IQM f.p. <= 4	Comport. fragile
1	fm: 1.20 - tau0.fv0: 1.20		1.20	☐	1.00	0.50	☑	☐	☑	☐	☐
2	fm: 1.20 - tau0.fv0: 1.20		1.20	☐	1.00	0.50	☑	☐	☑	☐	☐

Fig. 16. Ipotesi (B): soluzione di progetto. Dati maschi murari

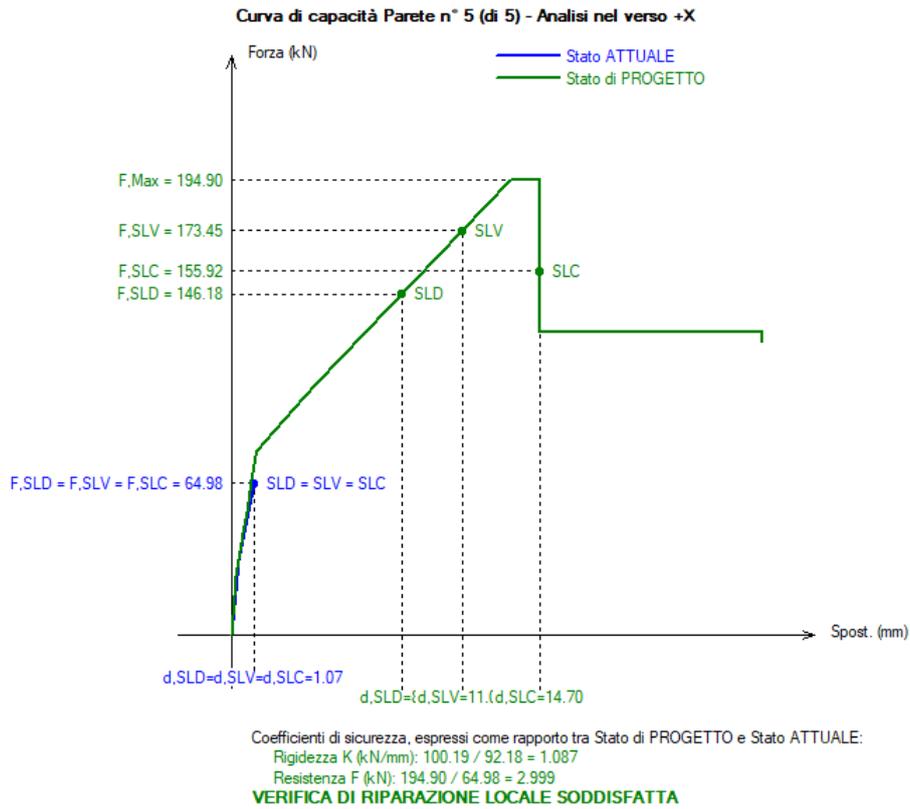


Fig. 17. Ipotesi (B): curve di capacità per analisi sismica +X

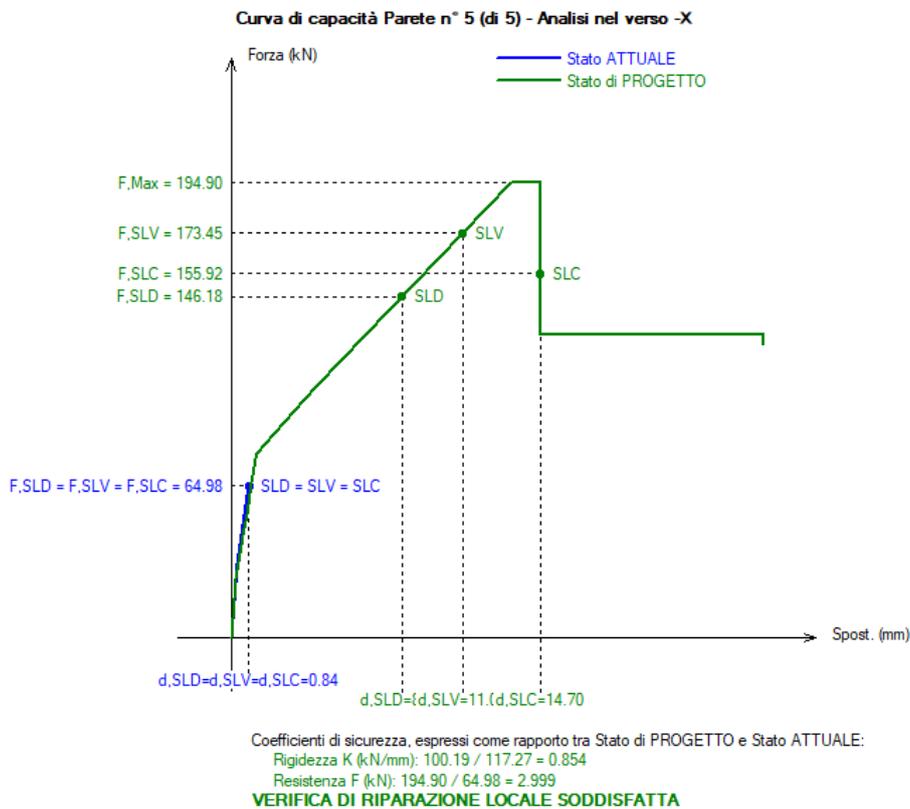


Fig. 18. Ipotesi (B): curve di capacità per analisi sismica -X

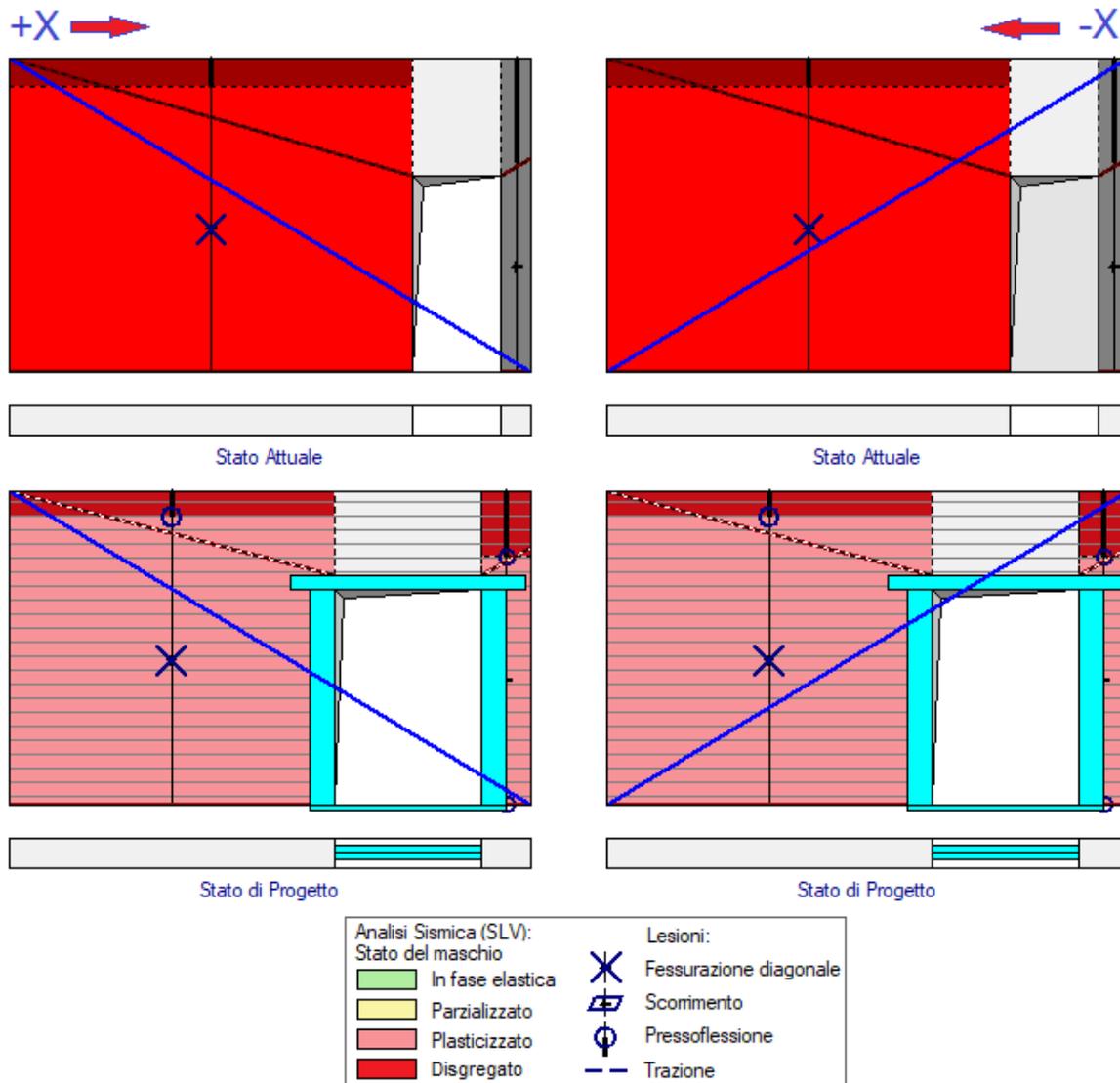


Fig. 19. Ipotesi (B): stato di sollecitazione dei maschi in corrispondenza di SLV

La curva di capacità generata dal comportamento fragile allo Stato Attuale corrisponde ad un tratto lineare elastico (in colore blu nelle figg. 17, 18). La grafica dello stato della parete in corrispondenza di SLV (fig. 19) evidenzia, allo Stato Attuale, la disgregazione della muratura, fenomeno che si manifesta al raggiungimento del limite di resistenza a taglio.

Rispetto all'ipotesi di muratura originaria non disgregabile (dove si era in presenza di ricorsi e connessioni trasversali), la soluzione ottimale allo Stato di Progetto richiede un telaio di maggiori rigidità e resistenza, fermo restando che la riqualificazione della muratura mediante la ristilatura dei giunti rimane il passo fondamentale dell'intervento di consolidamento.

Ulteriori indagini sugli effetti del comportamento fragile di murature soggette a disgregazione devono essere condotte nell'ambito del comportamento sismico complessivo di un edificio, dove la valutazione globale della vulnerabilità avviene tramite l'indicatore di rischio sismico ζ_E .

Inserendo nella modellazione di un edificio in muratura scadente l'informazione della possibile disgregazione, si otterrà una valutazione più realistica dello stato di fatto: i valori in ribasso di ζ_E indicheranno la necessità generale della riqualificazione muraria, qualunque sia il quadro degli interventi previsti dal progetto di consolidamento.

CONCLUSIONI

In una parete storica in muratura, **giunti di malta degradati determinano sconnessione e instabilità degli elementi lapidei**. Sotto azioni sismiche, **la malta scadente**, insieme all'assenza di ricorsi e di connessioni trasversali, **può determinare disgregazione**, crisi fragile che precede l'attivazione dei cinematicismi fuori piano e delle capacità di resistenza e spostamento nel piano. **Gli interventi richiedono la riqualificazione della muratura**.

Come noto, lo studio di un intervento nell'ambito della Riparazione Locale si conduce attraverso la valutazione analitica della capacità ante (Stato Attuale) e post (Stato di Progetto); l'analisi viene condotta su un modello definito dalle capacità di resistenza e di spostamento, seguendo le indicazioni della Normativa tecnica vigente riguardanti il comportamento statico degli elementi in muratura. In entrambi gli Stati, la validazione del calcolo richiede come prerequisito solidi che dal punto di vista strutturale siano realmente assimilabili ad elementi resistenti.

Una parete caratterizzata da malta scadente, soggetta a possibile disgregazione, deve essere modellata tenendo conto del comportamento fragile corrispondente a tale meccanismo. In uno Stato di Progetto, qualunque sia l'intervento previsto, la rigenerazione della muratura, ad esempio tramite ristilatura profonda dei giunti di malta, è da considerarsi indispensabile.

La Normativa vigente non fornisce criteri espliciti né per la modellazione del comportamento fragile di maschi murari soggetti a possibile disgregazione, né per la valutazione dell'intervento di ristilatura non armata ad esempio tramite coefficienti correttivi. Per entrambi questi aspetti, sono stati sviluppati e proposti nella presente Ricerca criteri di calcolo coerenti con le indicazioni normative

E' stato quindi analizzato un caso applicativo relativo ad una parete muraria di qualità scadente, da sottoporre ad un intervento con modifica delle aperture. Si è discussa la validità di diverse ipotesi sugli Stati Attuale e di

Progetto, mantenendo l'obiettivo di inquadramento dell'intervento nell'ambito della Riparazione Locale. Si è mostrato che nel caso di interventi su murature scadenti soggette a possibile disgregazione, l'analisi dello Stato Attuale si conduce mediante un modello elasto-fragile, ottenuto dal modello elasto-plastico annullando il tratto di duttilità. Per l'inclusione dell'intervento nell'ambito della riparazione locale è necessario considerare come favorevole l'incremento di duttilità, che nel caso di una muratura inizialmente soggetta a disgregazione diviene non tanto un incremento quanto **un'implementazione di duttilità, originariamente assente**.

Si è constatato che anche nel caso di muratura non soggetta a disgregazione, ma di qualità scadente, l'intervento di rigenerazione tramite ristilatura dei giunti conferisce un aumento di capacità di spostamento, e talvolta anche della resistenza, piuttosto rilevante: questo effetto deve essere considerato in senso positivo nei confronti della verifica locale, secondo quanto di seguito precisato.

La Normativa vigente, in §C8.4.1, afferma che l'intervento locale non deve modificare significativamente rigidità, resistenza nei confronti delle azioni orizzontali e capacità di deformazione della struttura. Tali indicazioni hanno lo scopo di evitare squilibri di rigidità (che richiederebbero valutazioni estese al resto dell'edificio) e, sostanzialmente, peggioramenti di resistenza e capacità deformativa.

In particolare, **il controllo di non peggioramento su resistenza e capacità deformativa assume particolare rilievo nel caso di murature originariamente di bassa qualità rigenerate allo Stato di Progetto attraverso interventi quali la ristilatura dei giunti**. Per questi tipi di consolidamento, la verifica di intervento locale si riterrà soddisfatta se lo Stato di Progetto mostra rispetto allo Stato Attuale una

variazione in aumento delle capacità di resistenza e deformazione, senza imporre che tale aumento sia delimitato da un valore massimo.

L'intervento di rigenerazione di murature di qualità scadente deve essere considerato un presupposto di progetto fondamentale ai fini della sicurezza, in grado di contrastare eventuali fenomeni disgregativi.

Ulteriori indagini sulle analisi globali degli edifici in muratura scadente indicheranno la necessità generale della riqualificazione muraria, qualunque sia il quadro degli interventi previsti dal progetto di consolidamento.

RINGRAZIAMENTI

La disgregazione muraria come causa fondamentale di collasso per edifici esistenti in muratura di scarsa qualità è stata identificata da Massimo Mariani, in un lavoro di grande rilevanza finalizzato alla corretta conoscenza del comportamento sismico reale degli edifici esistenti [8]. Attualmente, gli studi di Massimo Mariani proseguono, insieme all'Autore del presente documento, attraverso indagini sulla relazione fra contenuti sismici ad alta frequenza e fenomeni disgregativi.

Durante la presente Ricerca è stato prezioso il confronto con l'ing. Alessandro De Maria, coautore del Metodo IQM. Negli sviluppi più recenti, il metodo IQM ha valorizzato il ruolo del meccanismo di disgregazione muraria rendendone possibile l'inquadramento analitico nell'ambito delle valutazioni progettuali.

BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

[1] Borri A. et al.: Manuale delle murature storiche, a cura di C. Donà, con la collaborazione di A. De Maria, DEI, Tipografia del Genio Civile, Roma, 2011.

[2] Borri A., Corradi M., De Maria A.: The Failure of Masonry Walls by Disaggregation and the Masonry Quality Index, Heritage 2020, 3(4), 1162-1198.

[3] Borri A., De Maria A.: L'Indice di Qualità Muraria (IQM) e la disgregazione delle murature per effetto del sisma, Structural n. 229, maggio-giugno 2020.

[4] App IQMindex, www.iqmindex.com

[5] Aedes.ACM, Aedes Software, versione 2025 (*in corso di pubblicazione*)

[6] Pugi F.: Pareti in muratura e telai di cerchiatura: influenza del verso dell'azione sismica, Ingenio, 2022: <https://www.ingenio-web.it/articoli/pareti-in-muratura-e-telai-di-cerchiatura-influenza-del-verso-dell-azione-sismica/>

[7] Regione Toscana, Comitato Tecnico Scientifico in materia di rischio sismico (art. 3bis L.R. 58/2009 e Decreto del Presidente della Giunta regionale n. 83 del 22/5/2022): "Orientamenti interpretativi in merito alla classificazione degli interventi sugli edifici esistenti "

[8] Mariani M.: Terremoto e caos: un nuovo percorso di analisi del comportamento dei sismi, Ingenio, 2017: <https://www.ingenio-web.it/articoli/terremoto-e-caos-un-nuovo-percorso-di-analisi-del-comportamento-dei-sismi/>

[9] *Allegato all'Ordinanza commissariale n. 44 del 18/12/2018.*

<https://sisma2016.gov.it/wp-content/uploads/2019/11/Allegato-ordinanza-n.-44-del-15-dicembre-2017.pdf>