

LIVE, 15 settembre 2025

Francesco Pugi*

DISGREGAZIONE MURARIA E INTERVENTI LOCALI

*Ricerca e Sviluppo di AEDES Software,
francesco.pugi@aedes.it, www.aedes.it

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 possono innescarsi **disgregazioni****

INDICAZIONI NORMATIVE: GERARCHIA DEI MECCANISMI

Il fenomeno della disgregazione muraria è ben evidenziato nei contenuti della **Normativa Tecnica italiana**.

Le NTC2018, in §C.8.7.1, indicano il percorso progettuale per la valutazione della sicurezza delle costruzioni esistenti di muratura: anzitutto, si verifica la risposta del fabbricato alle azioni non sismiche; quindi, si passa ai meccanismi di dissesto locale per azioni sismiche, dove è opportuno riconoscere e analizzare le criticità locali che possano determinare situazioni di fragilità e rotture rovinose in occasione di scuotimenti. Successivamente, si procede alla verifica della risposta globale dell'edificio nei confronti delle azioni orizzontali sismiche che complessivamente possono agire su di esso, considerando il comportamento delle pareti per azioni nel proprio piano medio.

Sui meccanismi locali, §C8.7.1.2 si esprime indicando che l'identificazione dei meccanismi si ottiene con modellazioni specifiche basate sul comportamento sismico di strutture analoghe.

*“Devono essere considerate la **qualità della tessitura muraria** (anche in termini di ingranamento nello spessore), degli ammorsamenti tra le pareti e delle connessioni tra le pareti e gli orizzontamenti, la presenza di catene o altri elementi atti ad assorbire spinte (speroni e contrafforti) e le interazioni con altri elementi appartenenti alla costruzione o agli edifici adiacenti”.* L'indagine sulle proprietà meccaniche della parete condotta attraverso l'**Indice di Qualità Muraria** costituisce pertanto un aspetto fondamentale per il rispetto dei contenuti normativi.

Inoltre, nel paragrafo §C8.7.1.2.1, dedicato alle modalità di svolgimento dell'analisi cinematica con cui valutare i meccanismi locali per corpo rigido, si specifica anzitutto che **“la rappresentazione della struttura come catena cinematica di corpi rigidi è attendibile solo se la parete non è vulnerabile nei riguardi di fenomeni di disgregazione”**.

In base alle considerazioni illustrate, si può delineare *“in modo schematico, ma in linea del tutto generale, una strategia di analisi e progettazione degli interventi per gli edifici esistenti in muratura, che può essere denominata (in analogia con la “gerarchia delle resistenze” propria degli edifici in c.a.) come “**gerarchia dei meccanismi**” per le costruzioni murarie.*

Essa è sintetizzata nella tabella seguente ed è costituita da una serie di controlli (e di azioni conseguenti) ciascuno dei quali corrisponde ad una determinata problematica. I controlli e gli interventi più opportuni da attuare sono gerarchizzati in funzione della loro importanza, così da poter conseguire, alla fine, un adeguato comportamento complessivo della costruzione.

In altri termini: ogni passo è propedeutico al passo successivo, e realizzare un intervento senza aver prima garantito il soddisfacimento del requisito precedente può vanificare l'effetto dell'intervento stesso.”

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

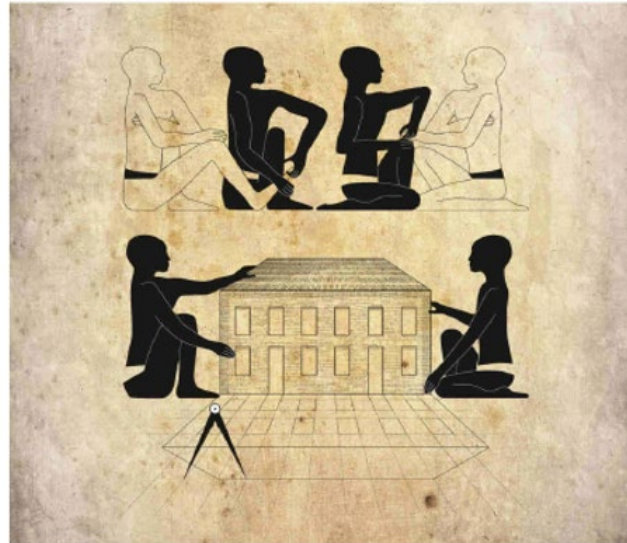
La "gerarchia dei meccanismi" per gli edifici esistenti in muratura

I modelli di calcolo devono quindi tenere conto, in particolare per la muratura storica, dei problemi legati alla disgregazione: per le pareti soggette a fenomeni disgregativi non si può identificare un comportamento strutturale competente a macroelementi poiché la struttura tende a decomporsi sotto le azioni cicliche sismiche e le schematizzazioni analitiche fondate su parametri di resistenza e deformabilità perdono significato; per tale motivo **il comportamento disgregativo precede, nella gerarchia, gli altri meccanismi resistenti.**

EDIFICI IN MURATURA ESISTENTI: INTERVENTI ANTISISMICI DA ADOTTARE

GUIDA ALLA VALUTAZIONE E PROGETTAZIONE DEGLI INTERVENTI ANTISISMICI LOCALI

PROF. ING. FRANCO BRAGA - ING. CARMENZO MIOZZI - ING. GIUSEPPE ROSSI - ING. MASSIMO SESSA

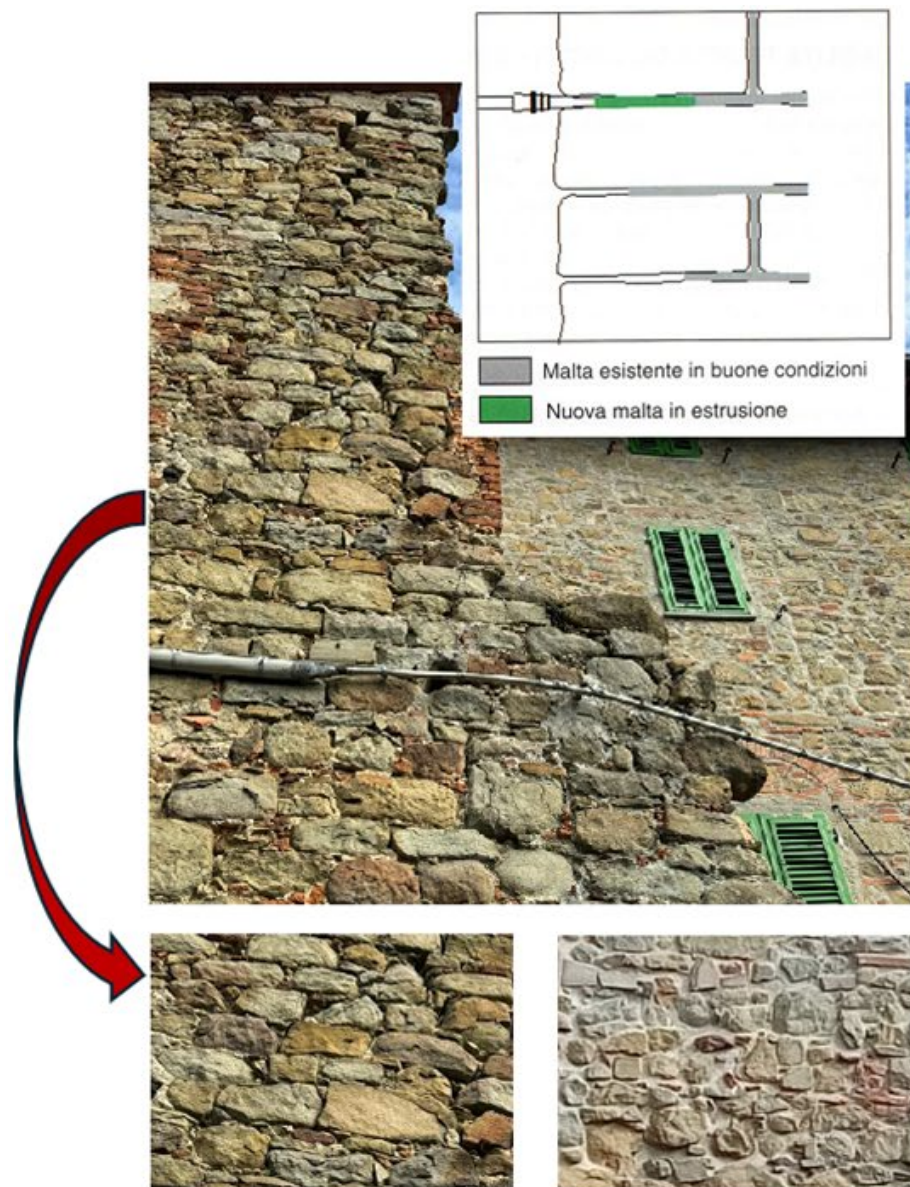


IN COLLABORAZIONE CON LA DIREZIONE SERVIZI AL PATRIMONIO DELL'AGENZIA DEL DEMANIO
ING. MASSIMO GABURRI - DOTT. UGOLO ILLUSTRO - ING. FRANCESCA RIGOLI - ING. VAPCO GAMBINO

<https://www.agenziademanio.it/it/agenzia/iniziative/pubblicazione-in-materia-antisismica/>

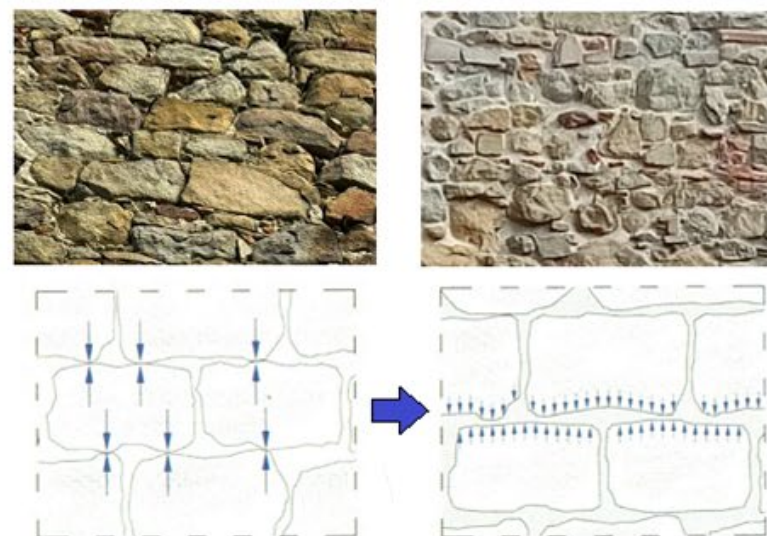
da pag. 94:

Nel caso di **cerchiature di nuove aperture**, gli schemi di calcolo correntemente utilizzati inducono la realizzazione di strutture molto rigide, spesso in c.a., che dovrebbero ricreare una struttura con comportamento analogo a quello della porzione di muratura rimossa, ma, a seguito dei terremoti, **gli elementi cerchianti rigidi producono molto spesso fenomeni locali di disgregazione della muratura, se questa è di scarsa qualità**, ovvero vengono espulsi dal pannello murario. Occorre utilizzare **schemi di calcolo, tecniche costruttive e materiali che interpretino meglio il reale comportamento delle costruzioni storiche**,



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.**



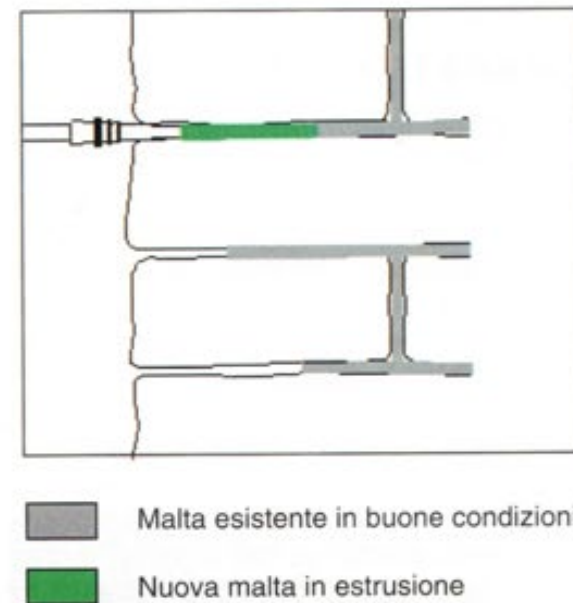
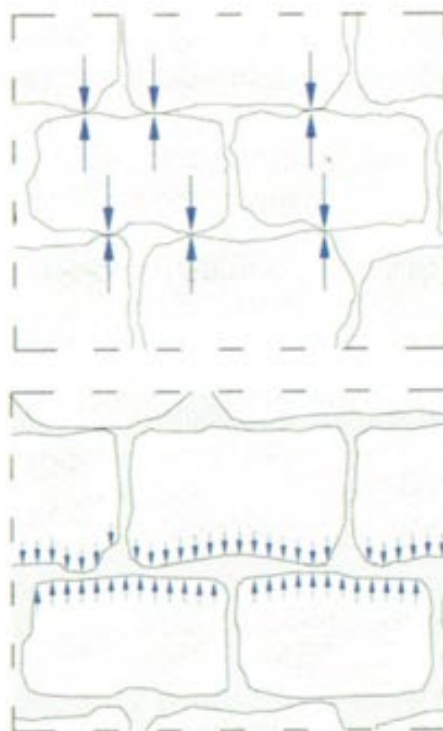
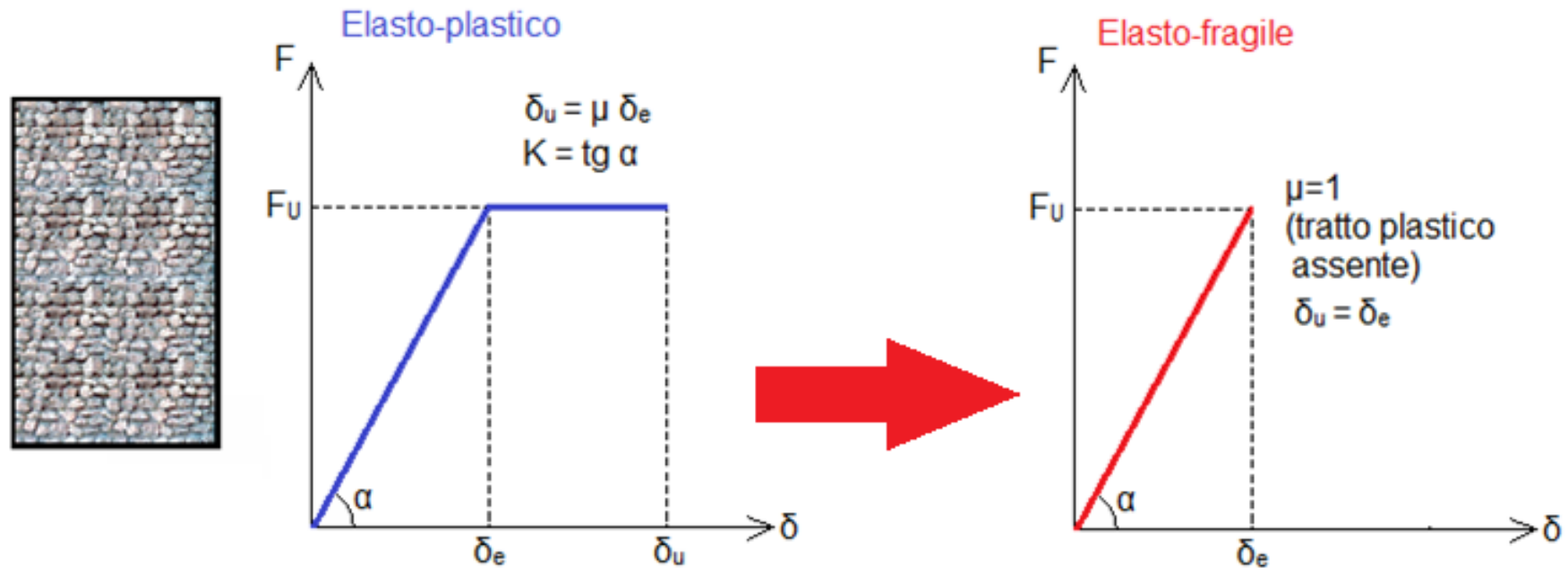


Fig. sx. Muratura in **pietrame fortemente degradata** per erosione e decoesione dei giunti di malta. Il degrado avanzato delle malte può provocare il **distacco dei blocchi lapidei** con instabilizzazione e caduta degli stessi.

Fig. centro. In mancanza di malta, il **contatto tra i conci è di tipo puntuale** e le forze di contatto 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. dx. Schema di intervento (ristilatura profonda dei giunti)

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 muraria, crisi di tipo fragile**



La disgregazione muraria della parete corrisponde alla **modifica del comportamento meccanico: da elasto-plastico a elasto-fragile**

Attraverso la **necessaria riqualificazione della muratura**, l'intervento di progetto le conferirà la **duttilità originariamente assente**



Effetti disagregativi dovuti agli eventi sismici in Italia Centrale, 2016.

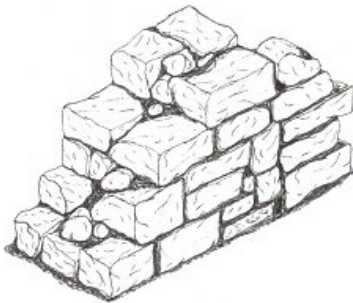
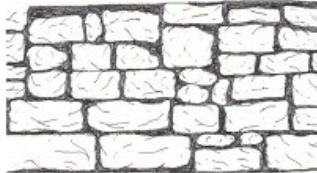
In alto: Pescara del Tronto; in basso: Corso Umberto I ad Amatrice prima dell'evento (a sx) e dopo l'evento (a dx) con stessa inquadratura fotografica



Danni sismici in Friuli (2016). In evidenza, un campanile non interessato dai fenomeni disagregativi

Quali sono i parametri che caratterizzano una muratura soggetta a fenomeni disagregativi?

Il parametro fondamentale è l'**Indice di Qualità Muraria (IQM)**

SCHEDA 11	5. METODI QUALITATIVI PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ MURARIA		
280	Muratura di blocchi di pietra sbozzata, ciottoli e pietrame a doppio paramento		
			FOTO
 Assonometria	 Prospetto	 Sezione	SCHEMI
	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

Esempio di scheda per la valutazione dell'Indice di Qualità Muraria

Il **metodo dell'Indice di Qualità Muraria (IQM)** per la **valutazione della qualità meccanica delle Murature**, messo a punto da Borri e De Maria, 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 ben correlato sia con i parametri meccanici della muratura, sia con le risposte strutturali attese.

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.

Si giunge ad una stima dei parametri meccanici coerente con la tabella di riferimento della Normativa. Viene così applicato quanto indicato dalla Normativa (§C8.5.3.1) dove si afferma 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.

Per una data muratura, IQM si distingue in 3 valori:

verticale (utilizzato per la stima di f_m e E), **nel piano** (per la stima di τ_0) e **fuori piano**.

IQM consente inoltre una **valutazione della maggiore o minore propensione alla disgregazione delle murature soggette alle azioni sismiche**.

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 ≤ 4 devono 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

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**. Tuttavia, poiché **l'azione sismica è di tipo spaziale, nel fenomeno della disgregazione sono coinvolte tutte le componenti** (nel piano, fuori piano e verticale) e questo autorizza, nell'ambito delle verifiche svolte considerando il comportamento nel piano (quali quelle tipiche degli interventi locali), l'adozione del modello di **comportamento di tipo elasto-fragile**.

Il primo parametro identificativo della tendenza alla disgregazione è:

$$\text{IQM}_{fp} \leq 4$$

Per comprendere il ruolo della qualità muraria nel processo di disgregazione, è utile riportare un estratto dai contenuti di Borri e De Maria (cui si rimanda per dettagli e approfondimenti, vd. note bibliografiche)

“I fattori maggiormente significativi nel favorire fenomeni disgregativi 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 disgregazione**.

Le murature che sono apparse maggiormente soggette a disgregazione 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 disgregativi) le murature dotate di **orizzontalità dei filari, di connessione trasversale e di malta di qualità buona qualità**.

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 disgregazione, 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 disgregativi.

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 (IQM_{FP})**; 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 $IQM_{FP} = 4$.

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 IQM_{FP} maggiori di 4.”

[illegible]

IQM fuori piano per le murature di Normativa. In evidenza, le tipologie di muratura a conci sbazzati

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

ID tipologia	Ricorsi o listature	Connessioni trasversali	Malta pessima*	modesta**	buona***	IQM fuori piano^
1			x			1.5
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
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

IQM fuori piano per la muratura a conci sbozzati.

$IQM_{FP} \leq 4$ è una condizione NECESSARIA ma non SUFFICIENTE:

affinché il fenomeno si manifesti occorre un'accelerazione sismica di intensità sufficientemente elevata, non inferiore quindi ad un valore **soglia di disgregazione a_D** , il cui valore può essere correlato a IQM_{FP} , come vedremo più avanti.

L'accelerazione sismica è l'accelerazione strutturale che investe la parete alla sua base, posta a quota Z (calcolata tramite Spettro di piano, amplificata rispetto alla PGA): a_Z .

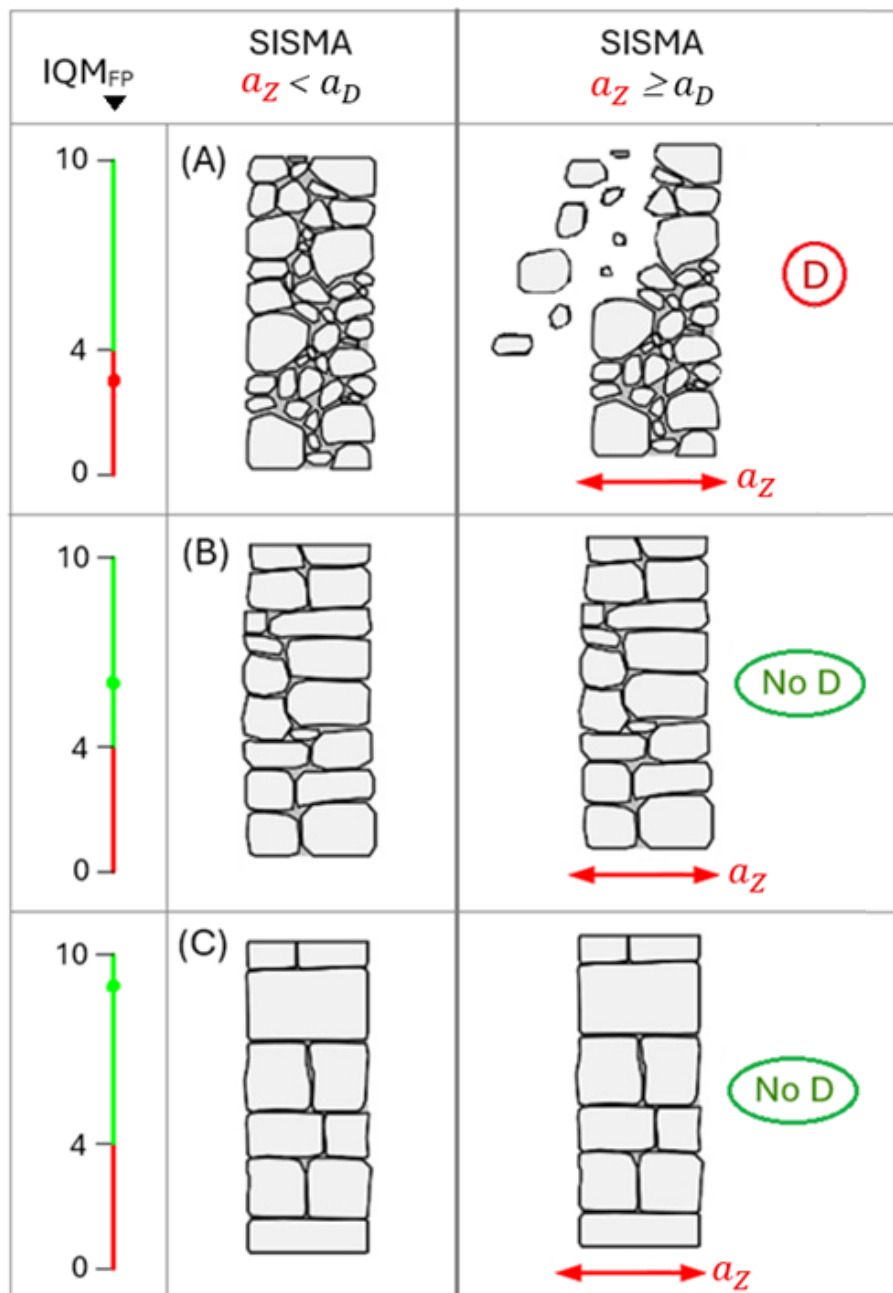
Il secondo parametro identificativo della tendenza alla disgregazione è:
acc. sismica strutturale $a_Z \geq$ acc. soglia di disgregazione a_D :

$$a_Z \geq a_D$$



CONDIZIONE NECESSARIA E SUFFICIENTE PER LA DISGREGAZIONE:

$$\begin{cases} IQM_{fp} \leq 4 \\ a_Z \geq a_D \end{cases}$$



$$D = f(IQM_{FP}; a_D; P)$$

Nella funzione f che lega IQM_{FP} a D sono inclusi l'**accelerazione soglia a_D** e l'**insieme P dei parametri geometrici e sismici** che caratterizzano la posizione della parete nell'edificio e l'accelerazione spettrale alla sua base dipendente dalla zona di ubicazione e dalle proprietà dinamiche dell'edificio.

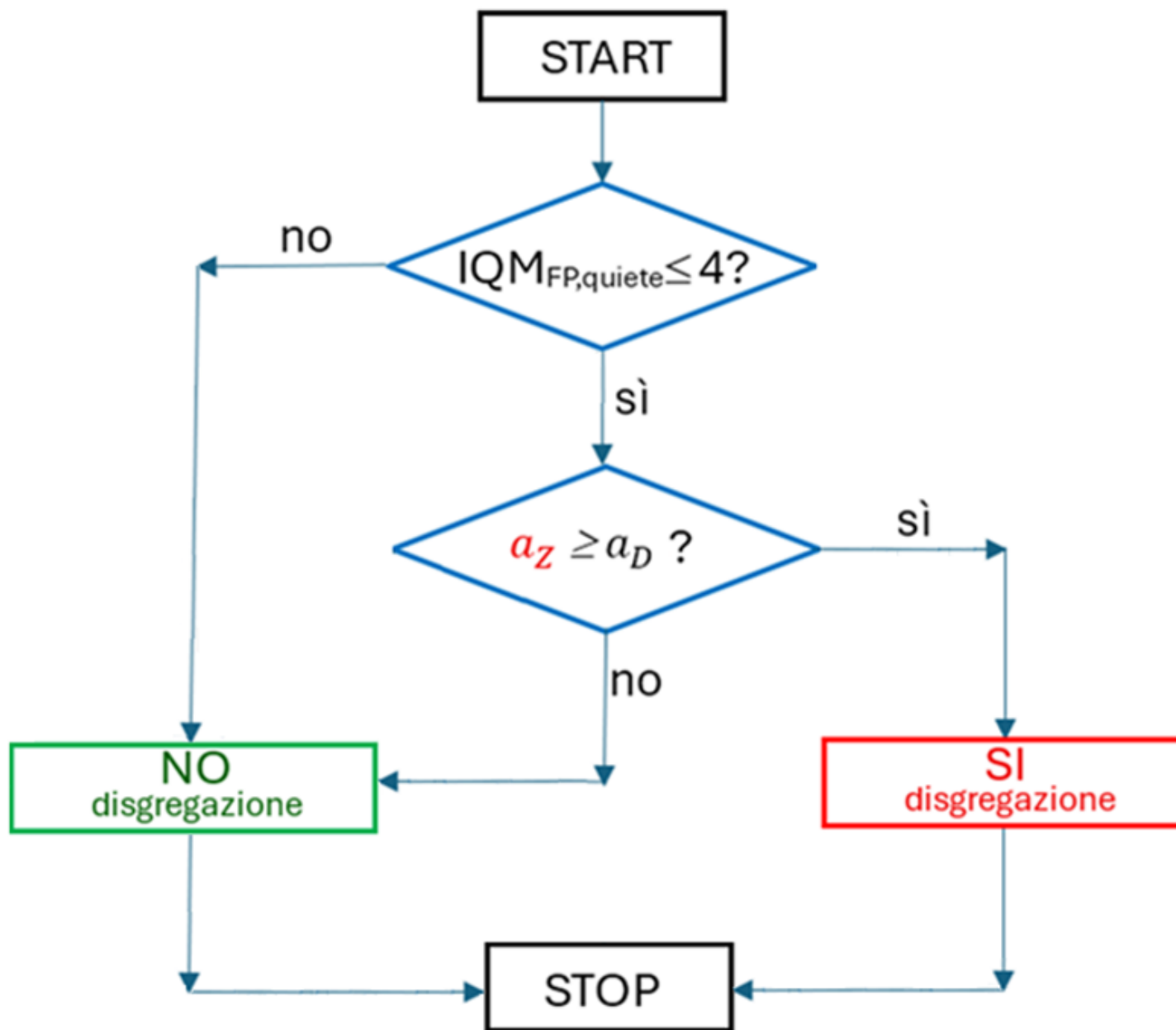
Se $IQM_{FP} > 4$, si ipotizza che il meccanismo di disgregazione non possa attivarsi. In figura sono presentate tre tipologie di muratura in pietra fra quelle presenti nella Normativa italiana, distinte per materiale costitutivo e per tessitura, organizzate secondo qualità crescente:

(A) muratura di pietrame disordinato, con $IQM_{FP} \leq 4$;

(B) muratura a conci sbozzati con IQM_{FP} superiore a 4;

(C) muratura a blocchi lapidei squadrati ben organizzata, con IQM_{FP} nettamente superiore a 4.

Un evento sismico di intensità tale da produrre un'accelerazione orizzontale alla base della parete superiore alla soglia di riferimento per la disgregazione, induce nella muratura di tipo (A) il meccanismo disgregativo, mentre le murature di tipo (B) e (C) non sono interessate da questo tipo di crisi.



*Processo di valutazione della tendenza alla disgregazione
per una parete in muratura sottoposta a sollecitazione sismica*

Accelerazione soglia di disgregazione a_D

In un lavoro presentato e pubblicato insieme a Massimo Mariani al Convegno Internazionale CompDyn 2025 (vd. note bibliografiche) è stato studiato il legame fra Disgregazione, Qualità Muraria e Jerk, contenuto impulsivo dell'azione sismica.

Consideriamo anzitutto il legame fra IQM_{FP} (Indice di Qualità Muraria fuori piano) e

Accelerazione soglia di disgregazione a_D *(sul ruolo del Jerk tratteremo nel corso del prossimo appuntamento Live sulle analisi globali).*

Nel corso degli studi, a_D era stata inizialmente stimata pari a un valore generale di riferimento (intorno a 0.300 g); in seguito, si è evidenziato un possibile **legame biunivoco fra a_D e IQM_{FP}** già utilizzabile per la progettazione.

Grazie ad alcuni risultati sperimentali, **si identifica in 0.15 g il valore di a_D corrispondente al minimo IQM_{FP} (pari a 0) e in 0.45 g il valore di a_D corrispondente a $IQM_{FP} = 4$.**

E' così possibile definire una funzione lineare che associa in modo biunivoco $IQM_{FP} \leq 4$ e soglia di attivazione della disgregazione a_D :

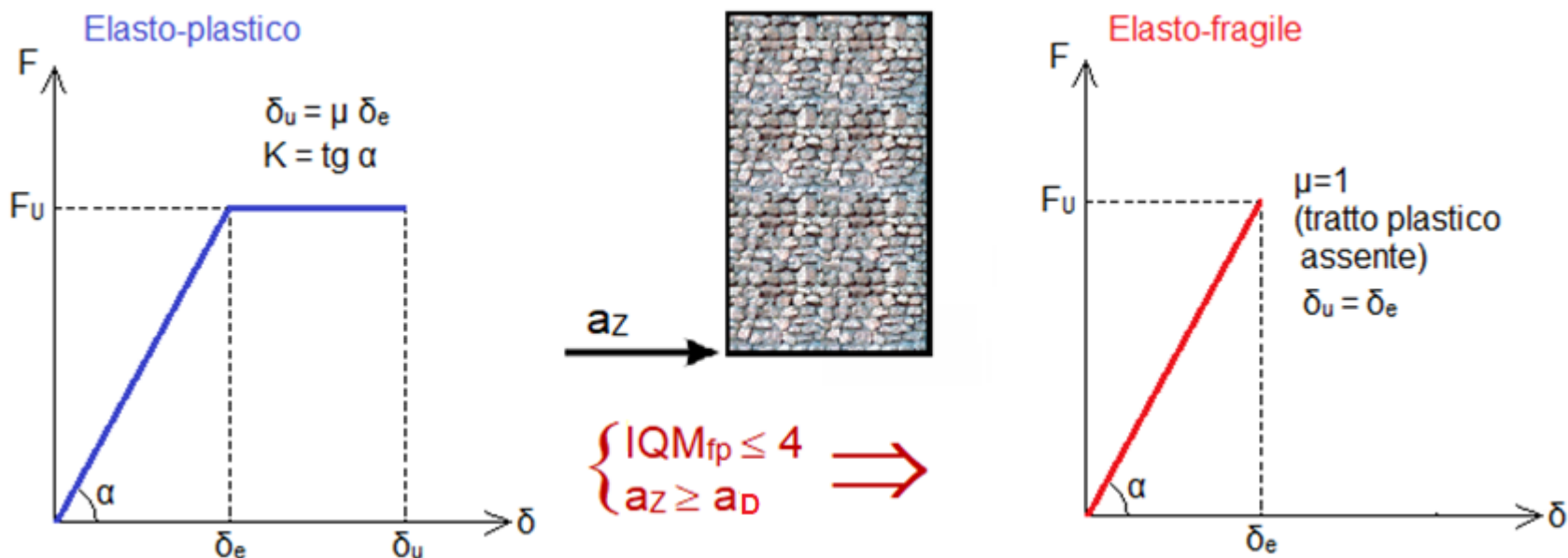
$$a_D = 0.150 \cdot \left(\frac{IQM_{FP}}{2} + 1 \right)$$

Modello delle pareti in muratura secondo Normativa: 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**. **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”*.



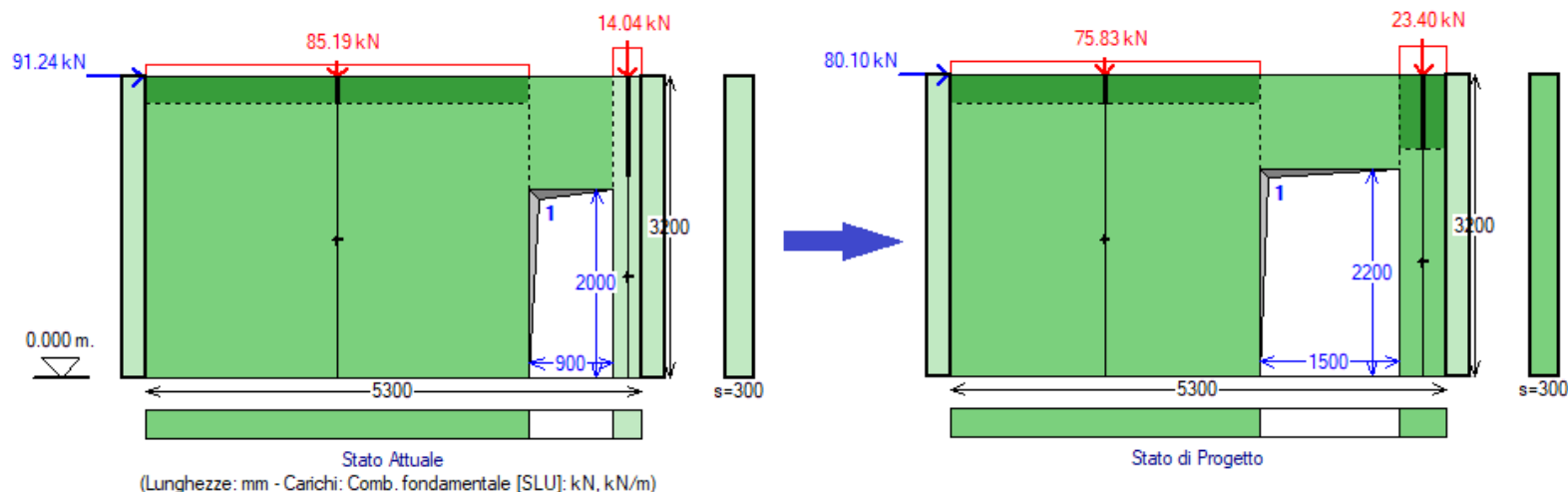
ESEMPIO APPLICATIVO:

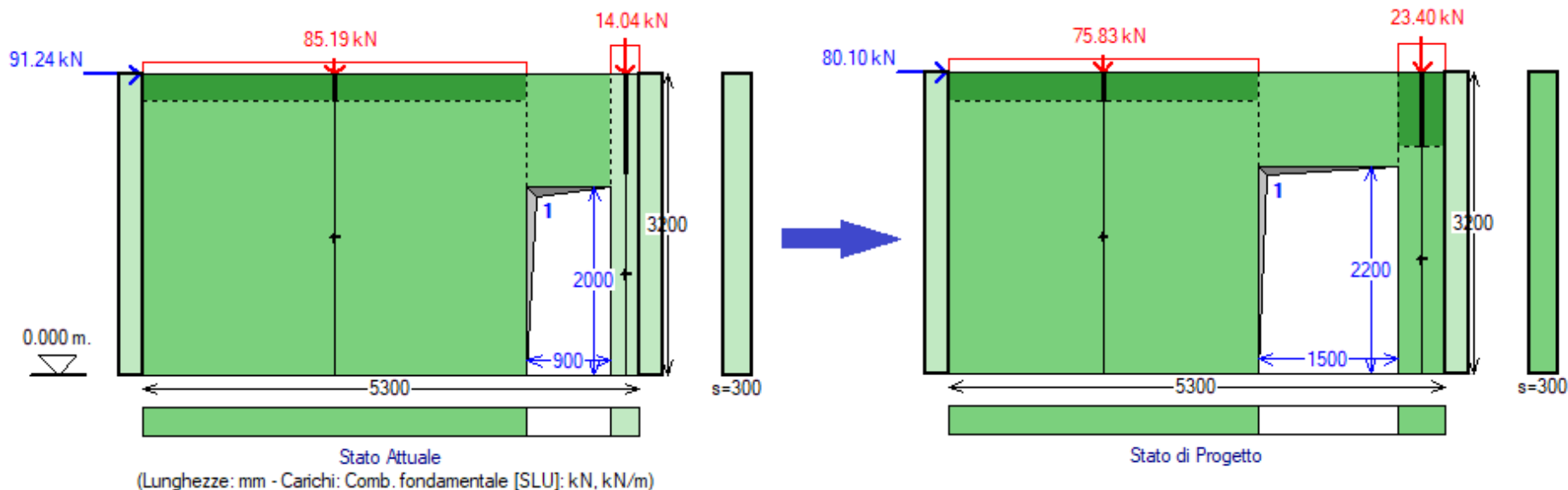
MODIFICA DI UN'APERTURA IN UNA PARETE IN MURATURA DI SCARSA QUALITA'

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; è interna, e si trova al 3° e ultimo piano di un edificio avente $H=9.00$ m., ed ha quota di base 5.80 m. $PGA_{SLV} = a_g \cdot S = 0.126 \cdot 1.200 = 0.151$ 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**: larghezza 150 cm. e altezza 220 cm.





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.

La scarsa qualità muraria visivamente riscontrata deve essere analizzata con attenzione in modo da poter inquadrare le effettive capacità meccaniche dell'elemento strutturale.

Grazie all'Indice di Qualità Muraria **IQM** si ottiene una definizione specifica dei parametri meccanici.

2 casi per la tessitura muraria della parete:

(A) Presenza di connessioni trasversali e di ricorsi orizzontali.

(B) Assenza di connessioni trasversali e di ricorsi orizzontali.

NB. Quando si valutano i parametri meccanici mediante IQM, non si devono applicare i coefficienti correttivi dello Stato di Fatto riportati in Tab. C8.5.II: ricorsi o listature e connessione trasversale sono già considerate nel calcolo di IQM e dei conseguenti parametri meccanici

La parete viene analizzata con il **software Aedes.ACM 2025**.



CASO (A)

IQM fuori piano risulta pari a $4.55 > 4 \Rightarrow$ la parete non è soggetta a disgregazione.

Come da Normativa, il diagramma di comportamento è di tipo elasto-plastico, con un tratto orizzontale corrispondente alla duttilità.

CASO (B)

IQM fuori piano è pari a $1.05 < 4 \Rightarrow$ si attiva la possibilità di disgregazione:

l'accelerazione soglia di disgregazione a_D è pari a $0.15 + (1.05/2 + 1) = 0.229$ g.

L'accelerazione strutturale a_z alla base della parete, calcolata con lo Spettro di piano, è 0.318 g, quindi superiore alla soglia richiesta affinché la disgregazione si attivi.

Il diagramma di comportamento della parete perde totalmente la duttilità: è di tipo elasto-fragile.

Caso (A). Malta scadente, presenza di ricorsi e di connessioni trasversali

STATO ATTUALE

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**.

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).

Secondo la **Tab. C8.5.I di Normativa** (senza valutazione di IQM)

per la muratura a conci sbozzati con malta scadente i valori di riferimento sono i seguenti

$$f_m = 2.00 \cdot 0.70 = 1.40, \quad \tau_0 = 0.035 \cdot 0.70 = 0.025, \quad E = 1230 \cdot 0.8 = 984, \quad G = 410 \cdot 0.8 = 328$$

Applicando i coefficienti correttivi per ricorsi e connessione trasversale: $1.2 \cdot 1.5 = 1.80$:

$$f_m = 1.40 \cdot 1.80 = \mathbf{2.52}, \quad \tau_0 = 0.025 \cdot 1.80 = \mathbf{0.045}, \quad E = 1230, \quad G = 410$$

STATO DI PROGETTO

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

Con la rigenerazione della malta, si applica il coefficiente correttivo 1.2 corrispondente alla ristilatura del 50% dei giunti: $(1.00 + 50\% \cdot 0.4) = 1.2$, per cui si ha:

$$f_m = 2.78 \cdot 1.20 = \mathbf{3.34}, \tau_0 = 0.051 \cdot 1.20 = \mathbf{0.061}, E = 1597 \cdot 1.2 = \mathbf{1916}, G = 487 \cdot 1.2 = \mathbf{584}$$

Secondo la **Tab. C8.5.I di Normativa** (senza valutazione di IQM)

per la muratura a conci sbazzati con malta standard i valori di riferimento sono i seguenti

$$f_m = 2.00 \cdot 1.80 = 3.60, \tau_0 = 0.035 \cdot 1.80 = 0.063, E = 1230, G = 410$$

da amplificare con il coefficiente correttivo 1.2 corrispondente alla

ristilatura del 50% dei giunti: $(1.00 + 50\% \cdot 0.4) = 1.2$, per cui si ha:

$$f_m = 3.60 \cdot 1.20 = \mathbf{4.32}, \tau_0 = 0.063 \cdot 1.2 = \mathbf{0.076}, E = 1230 \cdot 1.2 = 1476, G = 410 \cdot 1.2 = 492$$

Caso (B). Malta scadente, assenza di ricorsi e di connessioni trasversali

STATO ATTUALE

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.

Secondo la tabella C8.5.I di Normativa (senza valutazione di IQM)

per la muratura a conci sbozzati con malta scadente i valori di riferimento sono i seguenti

$f_m = 2.00 \cdot 0.70 = \mathbf{1.40}$, $\tau_0 = 0.035 \cdot 0.70 = \mathbf{0.025}$, $E = 1230 \cdot 0.8 = 984$, $G = 410 \cdot 0.8 = 328$

STATO DI PROGETTO

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

Con la rigenerazione della malta, si applica il coefficiente correttivo 1.2 corrispondente alla ristilatura del 50% dei giunti: $(1.00 + 50\% \cdot 0.4) = 1.2$, per cui si ha:

$$f_m = 1.55 \cdot 1.20 = \mathbf{1.86}, \tau_0 = 0.026 \cdot 1.20 = \mathbf{0.031}, E = 1007 \cdot 1.2 = \mathbf{1208}, G = 317 \cdot 1.2 = \mathbf{380}$$

Secondo la tabella C8.5.I di Normativa (senza valutazione di IQM)

per la muratura a conci sbazzati con malta standard i valori di riferimento sono i seguenti

$$f_m = 2.00, \tau_0 = 0.035, E = 1230, G = 410$$

da amplificare con il coefficiente correttivo 1.2 corrispondente alla

ristilatura del 50% dei giunti: $(1.00 + 50\% \cdot 0.4) = 1.2$, per cui si ha:

$$f_m = 2.00 \cdot 1.20 = \mathbf{2.40}, \tau_0 = 0.035 \cdot 1.20 = 0.042, E = 1230 \cdot 1.2 = 1476, G = 410 \cdot 1.2 = 492$$

Negli Stati di Progetto, oltre alla rigenerazione della muratura, si valuterà la realizzazione di un telaio di cerchiatura con profilo a C.

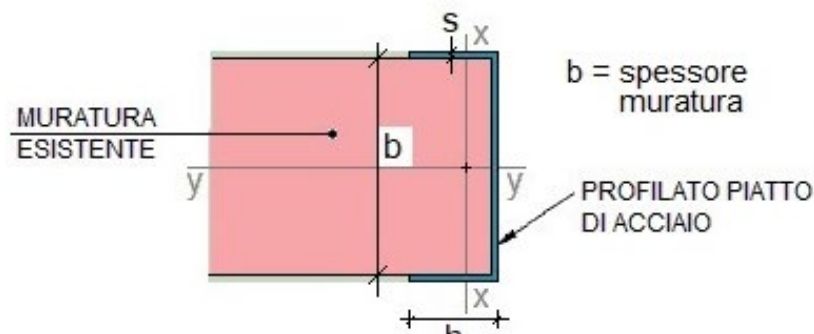
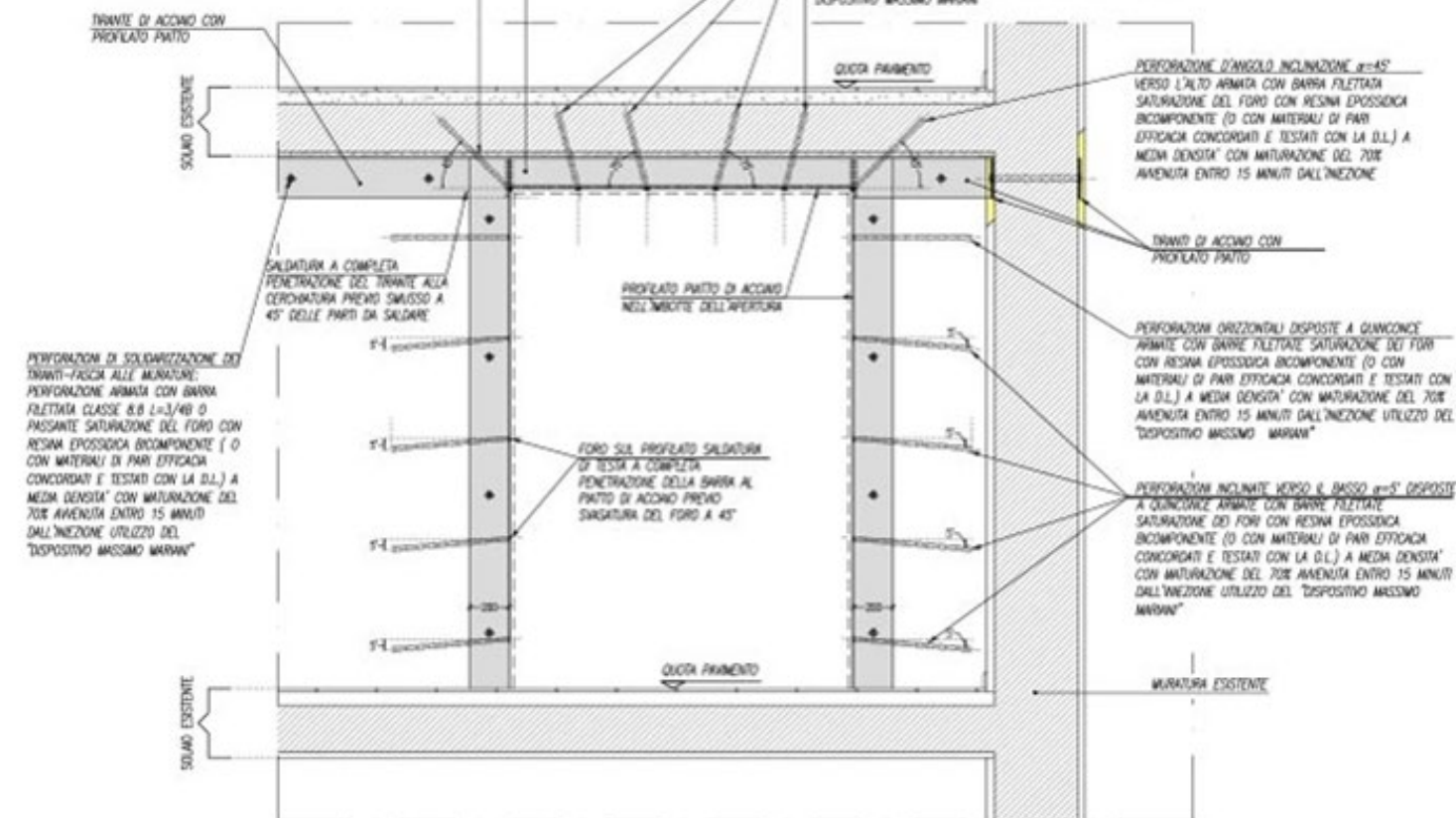
Con il **profilo a C proposto da Massimo Mariani** (vd. note bibliografiche), l'intervento di cerchiatura consente di **evitare la demolizione dei piedritti e dell'architrave**, come avviene quando si ricorre ai profilati di acciaio UPN o doppio T.

E' previsto un **rivestimento strutturale del vano d'apertura costituito da profilati piatti di acciaio che, saldati tra di loro, sono conformati secondo le geometrie della parete.**

Questa operazione darà vita ad una **sezione composta a "C"** che si farà aderire alla muratura.

PERFORAZIONE D'ANGOLO INCLINAZIONE $\alpha=75^\circ$ VERSO L'ALTO ARMATA CON BARRA FILETTATA SATURAZIONE DEL FORO CON RESINA EPOSSIDICA BICOMPONENTE (O CON MATERIALI DI PARI EFFICACIA CONCORDATI E TESTATI CON LA D.L.) A MEDIA DENSITA' CON MATURAZIONE DEL 70% AVVENUTA ENTRO 15 MINUTI DALL'INIEZIONE

PERFORAZIONI DISPOSTE A QUINCONCE INCLINAZIONE $\alpha=75^\circ$ VERSO L'ALTO ARMATE CON BARRE FILETTATE SATURAZIONE DEI FORI CON RESINA EPOSSIDICA BICOMPONENTE (O CON MATERIALI DI PARI EFFICACIA CONCORDATI E TESTATI CON LA D.L.) A MEDIA DENSITA' CON MATURAZIONE DEL 70% AVVENUTA ENTRO 15 MINUTI DALL'INIEZIONE UTILIZZO DEL "DISPOSITIVO MASSIMO MARIANI"



Dimensioni (mm):

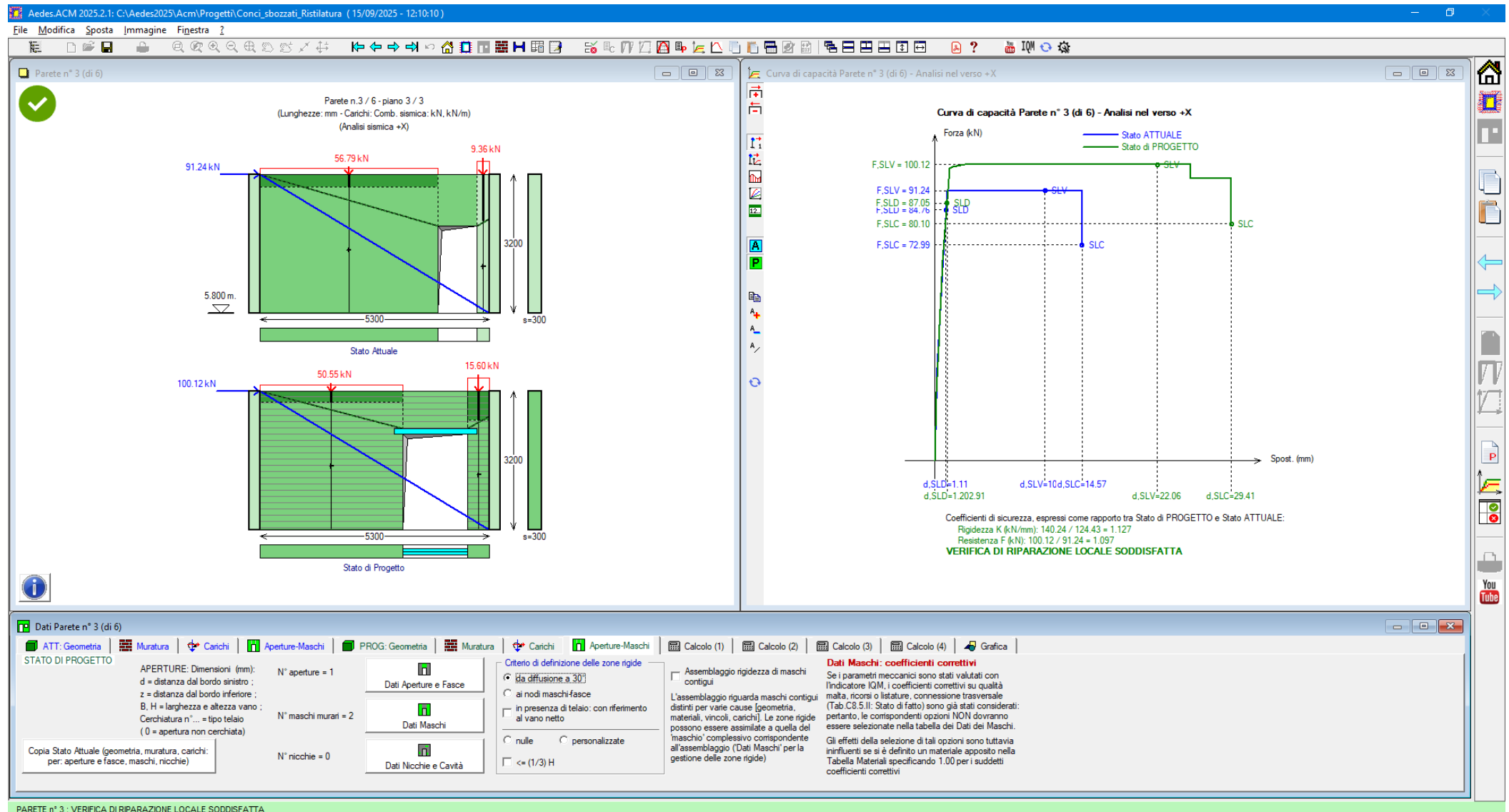
Spessore muratura $b =$

Dim. nel piano della parete: $h =$

Spessore acciaio $s =$

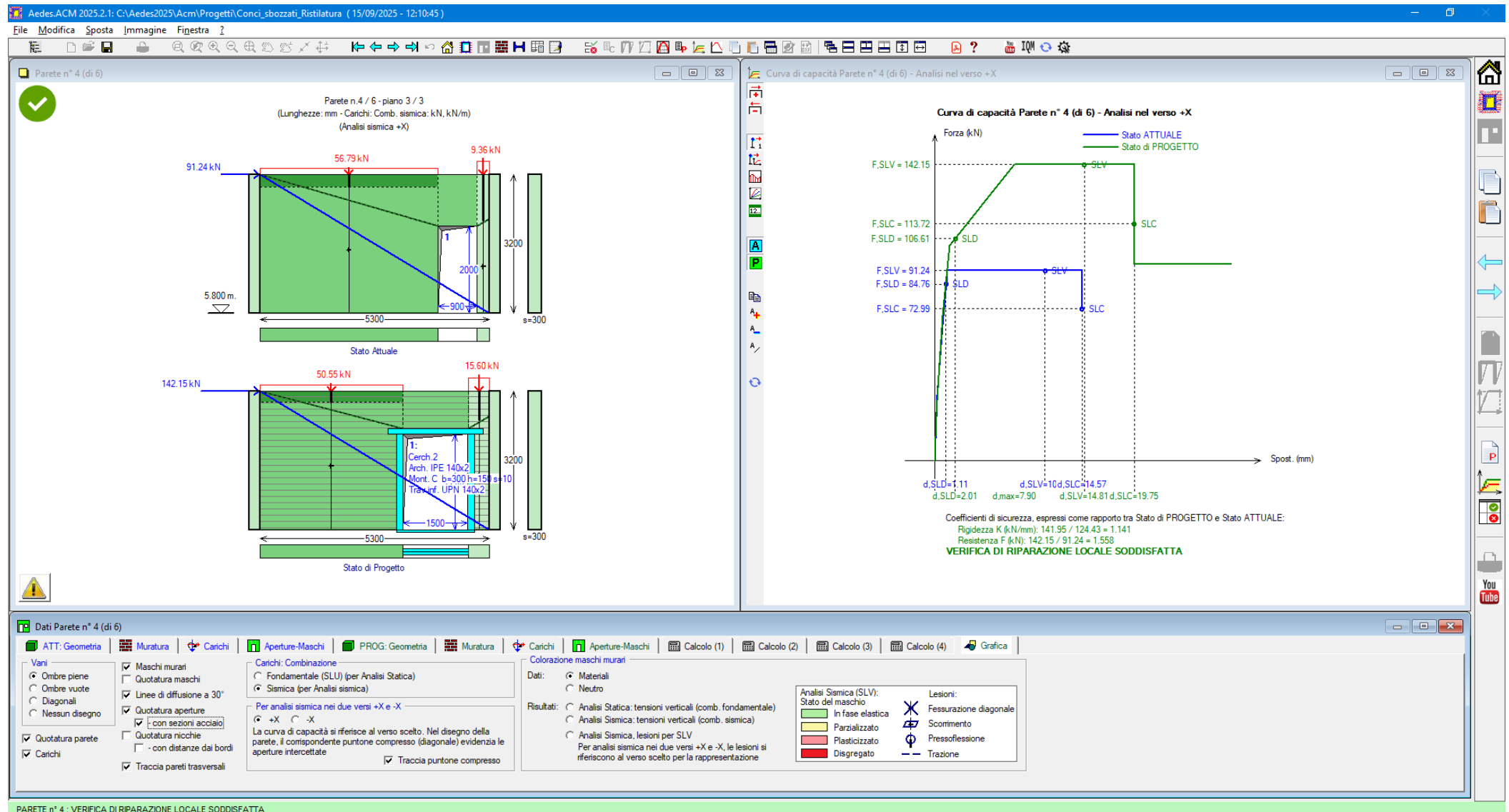
Caso (A), assenza di disgregazione.

1ª soluzione di progetto: muratura rigenerata



Caso (A), assenza di disgregazione.

2^a soluzione di progetto: muratura rigenerata + telaio con profilo a C b=300 h=150 s=10 mm.



CASO (B)

IQM fuori piano è pari a $1.05 < 4 \Rightarrow$ si attiva la possibilità di disgregazione:

l'accelerazione soglia di disgregazione a_D è pari a $0.15 + (1.05/2 + 1) = 0.229$ g.

L'accelerazione strutturale a_z alla base della parete, calcolata con lo Spettro di piano, è 0.318 g, quindi superiore alla soglia richiesta affinché la disgregazione si attivi.

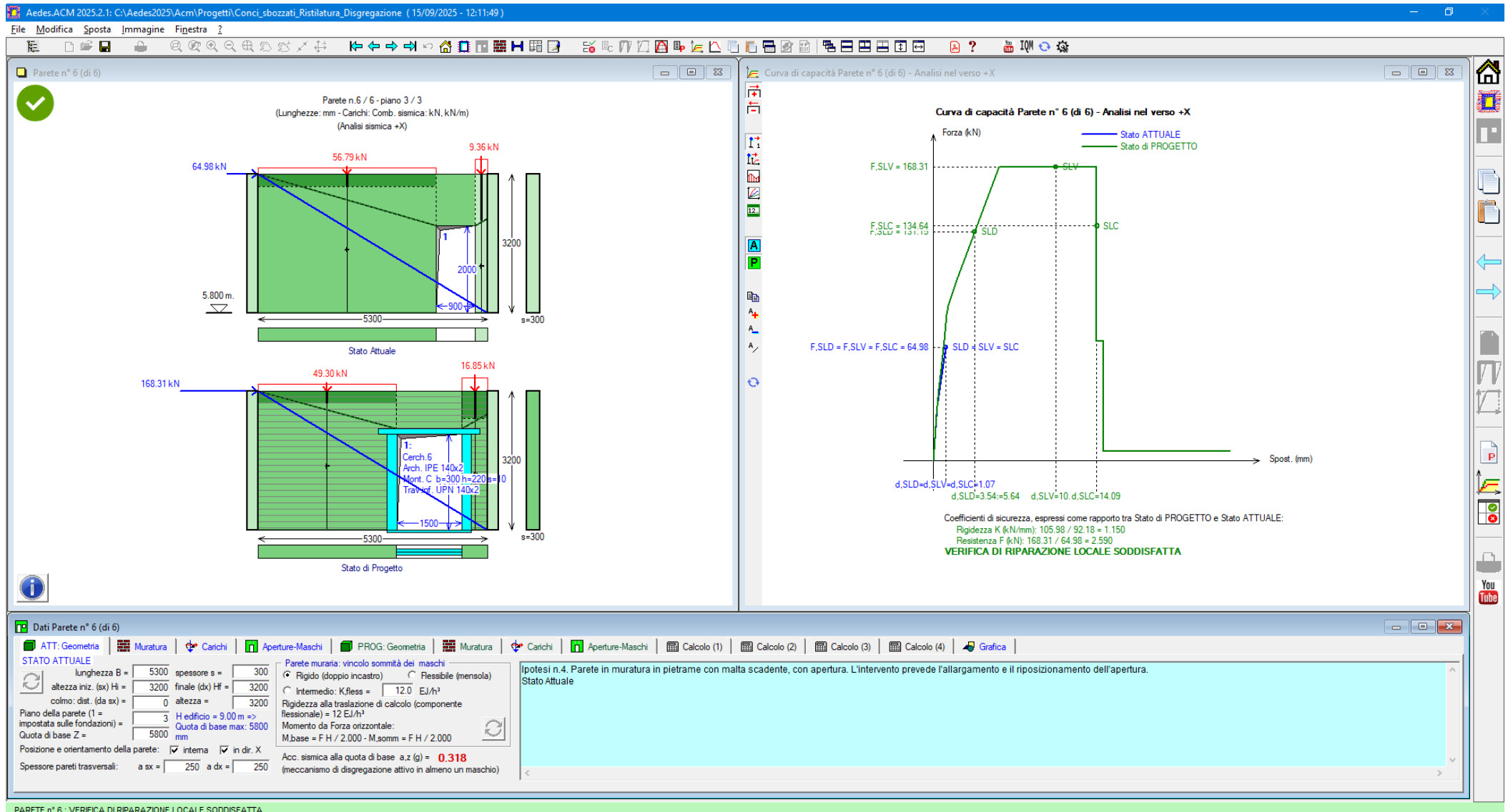
**Il diagramma di comportamento della parete perde totalmente la duttilità:
è di tipo elasto-fragile.**

Per ottenere una verifica di riparazione locale soddisfatta, lo Stato di Progetto prevede sia la ristilatura profonda dei giunti – necessaria, ma non sufficiente – sia un telaio a C con ala di 220 mm. (ala di 200 troppo poco rigida e ala di 250 troppo rigida).

L'esempio mostra che la malta scadente richiede comunque una rigenerazione, ma la tendenza alla disgregazione rende necessario anche un telaio di progetto che deve essere ben calibrato.

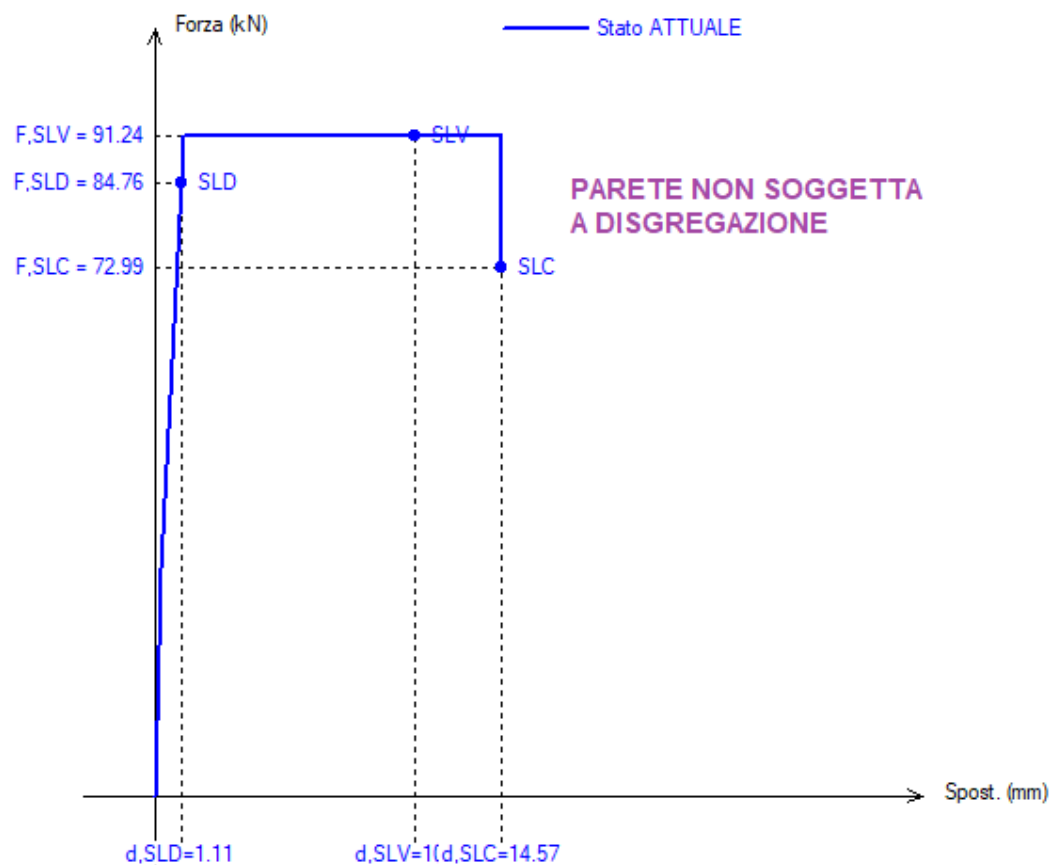
Caso (B), possibile disgregazione.

Soluzione di progetto: muratura rigenerata + telaio con profilo a C b=300 h=220 s=10 mm.

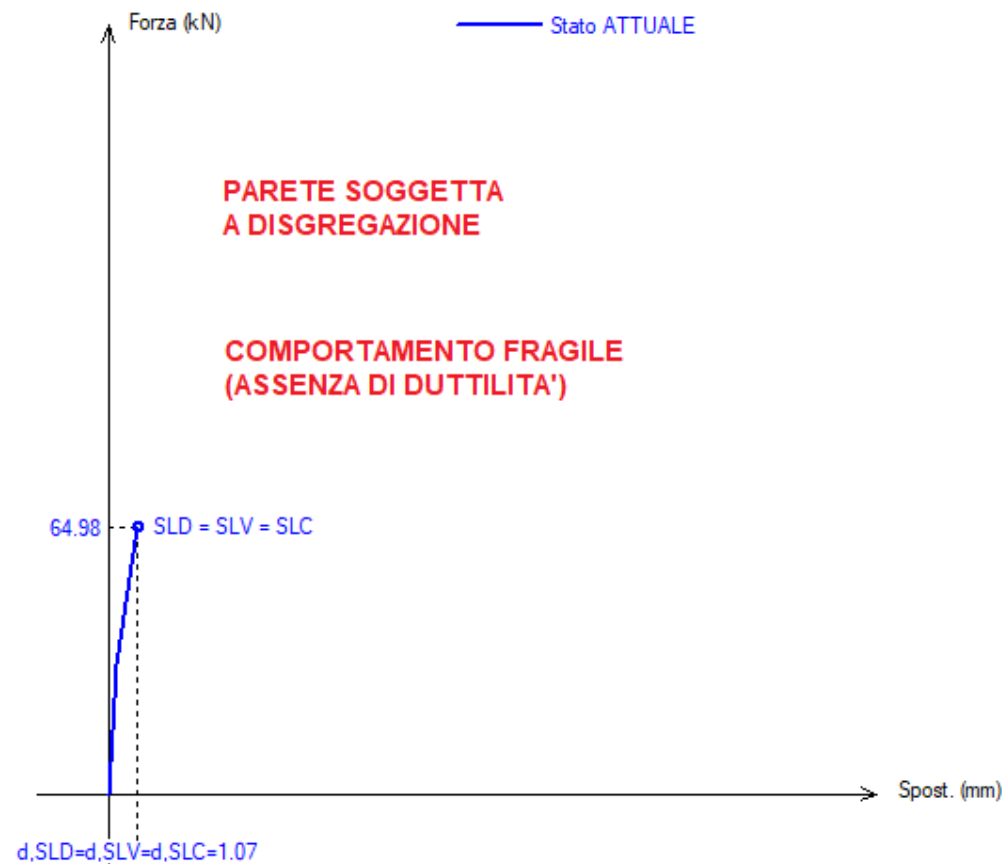


STATO ATTUALE: CONFRONTO CURVA DI CAPACITA' IN ASSENZA E IN PRESENZA DI POSSIBILE DISGREGAZIONE

Curva di capacità Parete n° 3 (di 6) - Analisi nel verso +X



Curva di capacità Parete n° 6 (di 6) - Analisi nel verso +X



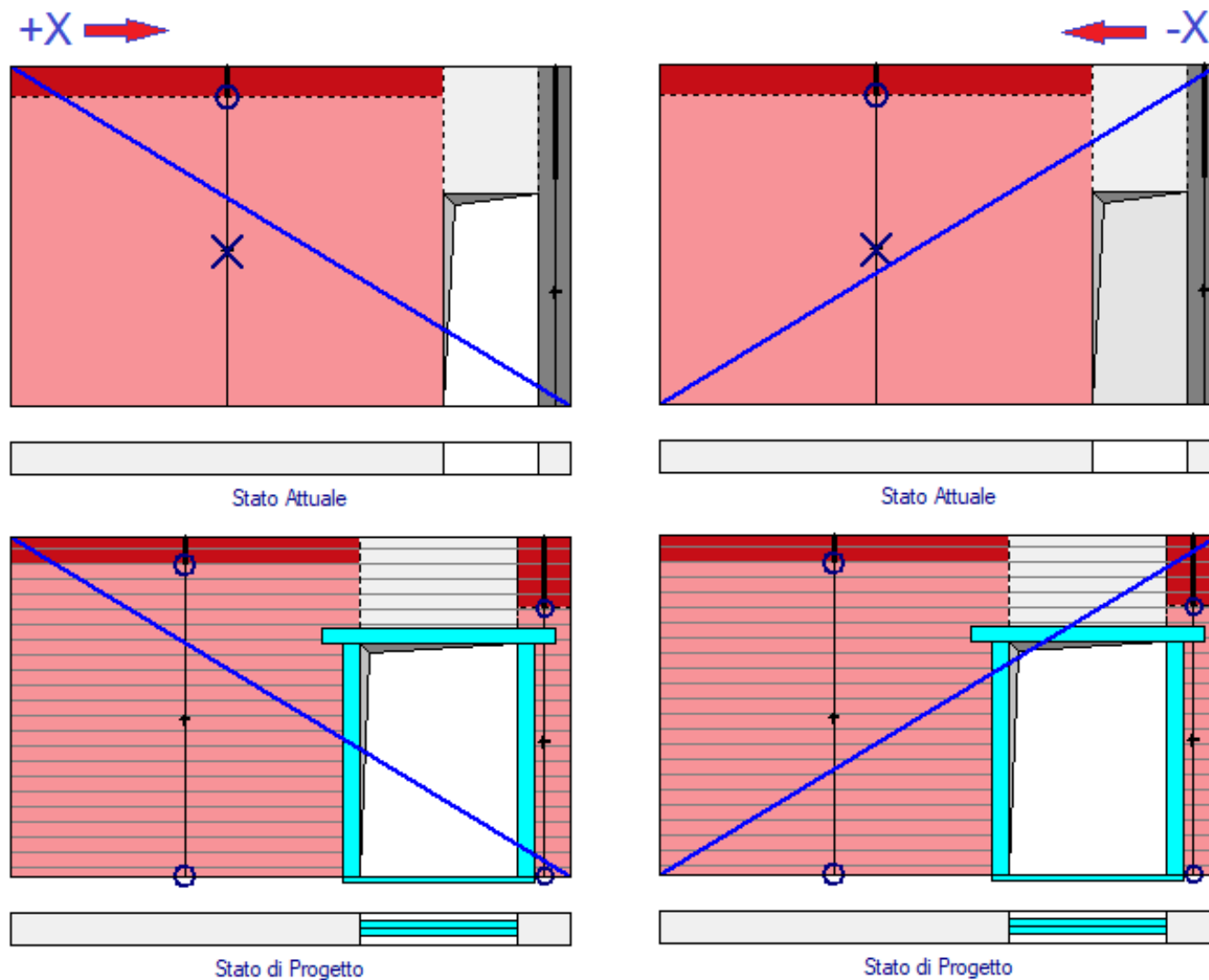
RISULTATI DELLE ANALISI con Aedes.ACM

Tipo di intervento	Assenza di disgregazione		Possibile disgregazione	
	+X	-X	+X	-X
1. Nessun intervento	⊗	⊗	⊗	⊗
2. Solo telaio C h=300	⊗	⊗	⊗	⊗
3. Sola ristilatura	☑	☑	☑	⊗
4. Ristilatura + telaio C h=150	☑	☑	☑	⊗
5. Ristilatura + telaio C h=250	⊗	☑	⊗	☑
6. Ristilatura + telaio C h=220	⊗	☑	☑	☑

➡ **La malta**, allo Stato Attuale di tipo **scadente**, **deve essere rigenerata**, che siano presenti o meno ricorsi o listature e/o connessioni trasversali

➡ Nell'ambito della Riparazione Locale, fondata sul confronto fra Stato di Progetto e Stato Attuale, **la possibile disgregazione richiede anche un telaio di rinforzo** deve essere correttamente calibrato

NB: I RISULTATI SI DISTINGUONO IN BASE AL VERSO: +X e -X



Analisi Sismica (SLV):	
Stato del maschio	
	In fase elastica
	Parzializzato
	Plasticizzato
	Disgregato
	Lesioni: Fessurazione diagonale
	Scorimento
	Pressoflessione
	Trazione

NOTE BIBLIOGRAFICHE

- Mariani M., Pugi F.: Accelerazione, Jerk e disgregazione muraria: effetti sismici sugli edifici esistenti in muratura, Ingenio, 2025:

<https://www.ingenio-web.it/articoli/accelerazione-jerk-e-disgregazione-muraria-effetti-sismici-sugli-edifici-esistenti-in-muratura/>

(edizione italiana di: Mariani M., Pugi F.: Acceleration, Jerk and Masonry Disaggregation. Seismic Effects on Existing Masonry Buildings, CompDyn 2025)

- Pugi F.: Interventi locali su murature scadenti. Disgregazione, ristilatura dei giunti, Ingenio, 2024:

<https://www.ingenio-web.it/articoli/interventi-locali-su-murature-scadenti-disgregazione-ristilatura-dei-giunti/>

- 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/>

- 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.

- 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.

- Mariani M.: Cerchiature delle aperture nelle strutture murarie: particolari costruttivi, Ingenio, 2022:
<https://www.ingenio-web.it/articoli/particolari-costruttivi-delle-cerchiature-delle-aperture-nelle-strutture-murarie/>
- Aedes.ACM, Aedes Software, versione 2025:



LIVE, 15 settembre 2025

Francesco Pugi*

**DISGREGAZIONE MURARIA
E INTERVENTI LOCALI**

*Ricerca e Sviluppo di AEDES Software,
francesco.pugi@aedes.it, www.aedes.it

Grazie per l'attenzione!

Appuntamento alla seconda parte:

LIVE 22 settembre

**DISGREGAZIONE MURARIA
E ANALISI GLOBALI**