Aedes
Software per Ingegneria Civile

Aedes.PCM 2025

PROGETTAZIONE DI COSTRUZIONI IN MURATURA

Analisi strutturale di costruzioni in muratura secondo la Normativa Tecnica vigente

Aggiornamento 2025

include:

- **Indici di Qualità Muraria (IQM)**
- **Verifica di Disgregazione Muraria**
- **Intervento di Ristilatura Non Armata**

Data di redazione di questo documento: 28.07.2025

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
E-mail: info@aedes.it - Internet: www.aedes.it

AVVERTENZE E CONDIZIONI D'USO
La AEDES Software si riserva il diritto di apportare miglioramenti o modifiche al programma PCM, 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.
PCM 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 PCM fino a quando non avrà sottoscritto la suddetta licenza d'uso.
L'Utente è responsabile della scelta di PCM 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 PCM sono quelle riportate nella licenza d'uso. La AEDES non garantisce che le funzioni contenute in PCM 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 PCM possono essere marchi di fabbrica o marchi registrati dalle rispettive Società.

Per la foto si ringrazia: Alessandro De Maria, Riccardo Norgini.

INDICE

1 Indici di Qualità Muraria (IQM) 3

1.1 Implementazione in Aedes.PCM 3

1.2 Riferimenti 8

2 Verifica di Disgregazione Muraria 9

2.1 Implementazione in Aedes.PCM 15

2.2 Riferimenti 17

3 Intervento di Ristilatura Non Armata 18

4 Drift per SLD locale 19

4.1 Estensione della verifica SLD allo Stato Limite di Danno per Beni Artistici (SLA) 20

1 INDICI DI QUALITÀ MURARIA (IQM)

Aedes.PCM 2025, in combinazione con il modulo ECS dedicato agli Elementi Costruttivi Storici e monumentali, introduce la possibilità di determinare le proprietà meccaniche delle murature esistenti attraverso il metodo IQM, Indici di Qualità Muraria [1, 2].

Il metodo IQM è nato nel 2002 presso l'Università di Perugia ed è stato perfezionato nel corso degli anni successivi anche grazie a ricerche condotte in ambito ReLUIS. Esso 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.

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

Per approfondimenti sulle caratteristiche e le modalità di applicazione del metodo è possibile fare riferimento al seguente documento:

Manuale per la valutazione dell'Indice di Qualità Muraria (IQM)

a cura di Antonio Borri e Alessandro De Maria.

Il documento è disponibile nella documentazione a Supporto del software Aedes, al seguente percorso: \Supporto\Documenti\Pubblicazioni\IT_IQM_Guida.pdf

1.1 IMPLEMENTAZIONE IN AEDES.PCM

Nelle proprietà delle murature esistenti è presente l'opzione **Valutazione IQM**.

Attivando questa opzione i parametri meccanici della muratura, cioè i moduli di elasticità (E, G) e le resistenze (f_m, τ_0, f_{vm0}) vengono determinati attraverso il metodo IQM. Per accedere alla finestra dedicata al metodo IQM è sufficiente cliccare sul pulsante [...] che appare nel campo denominato **Indici di Qualità Muraria**.

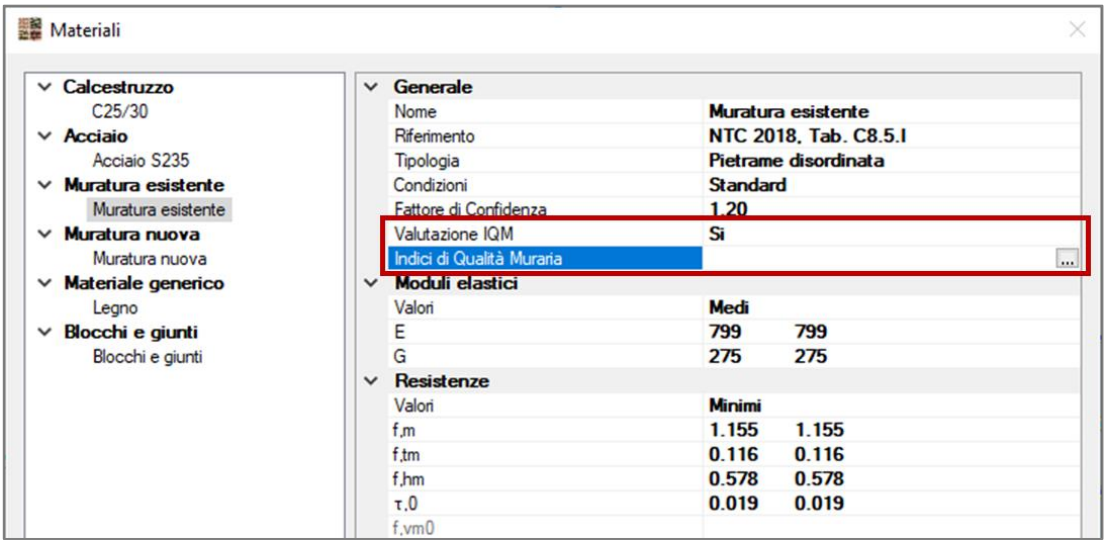


Figura 1. Proprietà del materiale Muratura Esistente: Valutazione IQM

La finestra degli Indici di Qualità Muraria si presenta come in figura seguente. È caratterizzata da 4 sezioni: Muratura, Parametri della Regola dell'Arte, Indici di Qualità Muraria, Proprietà meccaniche.

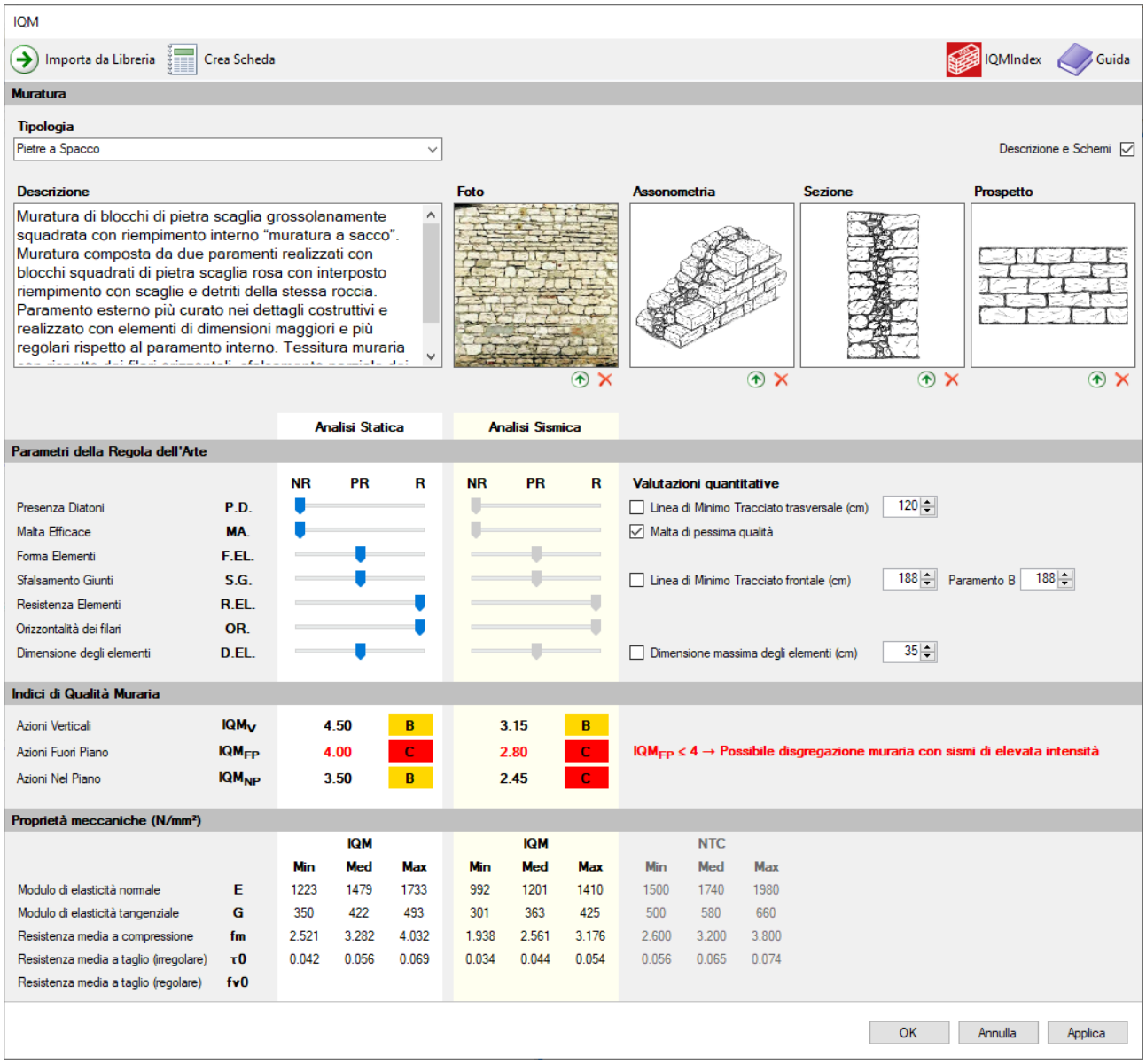


Figura 2. Finestra degli Indici di Qualità Muraria

Nella sezione **Muratura** è possibile modificare la **tipologia** di muratura scegliendo tra le 8 tipologie riportate nella Tabella C8.5.I della Circolare applicativa delle NTC 2018.

Selezionando una tipologia, i Parametri della Regola dell'Arte presenti nella sezione successiva vengono preimpostati sui valori di default previsti per tale tipologia.

Per alcune tipologie sono presenti caratteristiche opzionali che influiscono sulla valutazione della qualità muraria:

- per la muratura a "Conci sbozzati" è possibile specificare se vi è "sistematica presenza di zeppe profonde";
- per la muratura in "Mattoni pieni e malta di calce" è possibile specificare se i giunti di malta hanno spessore superiore a 13 mm.

Attivando l'opzione "Descrizione e Schemi" si attivano i campi dedicati a **Descrizione**, **Foto** e Schemi grafici della muratura in **Assonometria**, **Prospetto** e **Sezione**.
Le immagini possono essere caricate selezionando file esterni oppure possono essere importate da una libreria di murature attraverso il comando "Importa da libreria" che sarà descritto in seguito.

Nella sezione **Parametri della Regola dell'Arte** sono presenti sette parametri la cui valutazione determina gli Indici di Qualità Muraria:

P.D. Presenza dei Diatoni, ingranamento trasversale
MA. Qualità della Malta, Efficace contratto fra elementi, Zeppe
F.EL. Forma degli Elementi resistenti
S.G. Sfalsamento dei Giunti
R.EL. Resistenza degli Elementi
OR. Orizzontalità dei filari
D.EL. Dimensione degli Elementi resistenti

Ad ognuno di questi parametri è necessario attribuire un giudizio sul rispetto della regola dell'arte. Il giudizio può essere:

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

Per attribuire un giudizio ad un determinato parametro è sufficiente spostare il cursore della barra di scorrimento nella posizione desiderata. Indicazioni specifiche su come valutare ogni singolo parametro della regola dell'arte sono contenute nella **Guida** relativa al metodo IQM, accessibile attraverso un apposito pulsante nella barra degli strumenti.

Per alcuni parametri, il giudizio sul rispetto della regola dell'arte può essere determinato attraverso **Valutazioni quantitative**:

- La presenza di diatoni può essere valutata in base alla lunghezza della **Linea di Minimo Tracciato trasversale**.
- Nel caso in cui la malta abbia caratteristiche particolarmente scadenti (resistenza media a compressione inferiore a 0.7 N/mm^2), può essere attivata l'opzione "**Malta di pessima Qualità**". Attivando questa opzione, il parametro MA viene automaticamente impostato come Non Rispettato. Inoltre, coerentemente con le indicazioni normative (Circolare NTC 2018, §C8.5.3.1), ai soli fini dell'Analisi Sismica, nella determinazione degli Indici di Qualità Muraria viene applicato un coefficiente riduttivo m pari a 0.7 (questa impostazione si ripercuote quindi sulla determinazione delle proprietà meccaniche della muratura).
- Lo sfalsamento dei giunti può essere valutato in funzione della **Linea di Minimo Tracciato frontale**, specificando il valore sul paramento A e sul paramento B. In caso di parete a paramento unico, specificare lo stesso valore in entrambi i campi.
- La dimensione degli elementi resistenti può essere valutata in funzione **della Dimensione massima degli elementi**.

La valutazione dei parametri della regola dell'arte per Analisi Sismica segue fedelmente la valutazione svolta per l'Analisi Statica. Tuttavia, gli Indici di Qualità Muraria e le proprietà meccaniche della muratura potrebbero assumere valori distinti in caso di malta di pessima qualità.

Nella sezione **Indici di Qualità Muraria** vengono riportati i seguenti valori degli indici e la corrispondente **Categoria** (A, B, C):
IQM_V Indice di Qualità Muraria per azioni Verticali
IQM_{FP} Indice di Qualità Muraria per azioni Fuori Piano
IQM_{NP} Indice di Qualità Muraria per azioni Ne Piano

Qualora, in Analisi Sismica l'Indice di Qualità Muraria per azioni Fuori Piano sia **IQMFP ≤ 4**, un apposito messaggio indica la **possibile disgregazione muraria con sismi di elevata intensità**.
Per maggiori informazioni in merito alla verifica di disgregazione muraria consultare il capitolo ad essa dedicato.

La sezione **Proprietà meccaniche** riporta i valori di riferimento per Analisi Statica e Analisi Sismica dei moduli di elasticità e delle resistenze della muratura, determinati attraverso il metodo IQM.
I valori sono forniti sottoforma di intervallo, caratterizzato da valori minimi, medi e massimi. In questo modo in funzione del livello di conoscenza raggiunto sarà possibile selezionare opportunamente il valore da adottare nelle analisi. A titolo di confronto vengono riportati anche i valori di riferimento forniti dalla normativa per la tipologia muraria specificata (Circolare NTC 2018, Tabella C8.5.I).

Il comando **Importa da Libreria** consente di importare la valutazione della qualità muraria da una Libreria di 22 murature predefinite. Le informazioni contenute nella Libreria sono tratte dalle schede di valutazione della Qualità Muraria pubblicate dagli autori del metodo IQM, nell'ambito di una ricerca ReLUIS [3]. Possono essere importati tutte le informazioni della muratura oppure solo gli schemi (Assonometria, Prospetto, Sezione).

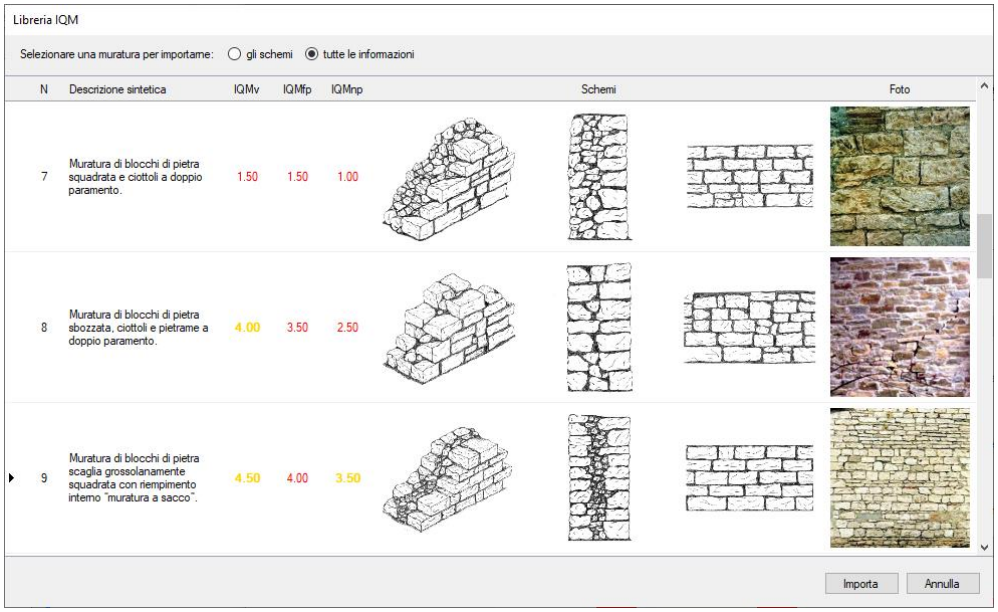


Figura 3. Libreria IQM

Dopo aver importato una muratura dalla Libreria, tutte le informazioni possono essere modificate dall'Utente per adeguarle al caso della muratura oggetto di studio.

Il comando **Crea Scheda** permette di creare una scheda riassuntiva della valutazione di Qualità Muraria in formato HTML. La scheda può essere quindi esportata in un file PDF cliccando sull'apposito pulsante nella barra degli strumenti.

Scheda IQM

VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ MURARIA

Muratura esistente

Muratura

Descrizione

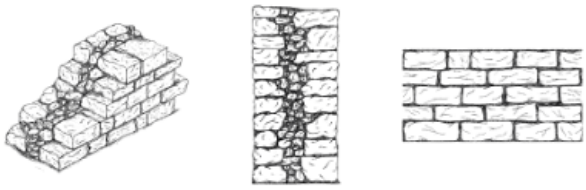
Muratura di blocchi di pietra scaglia grossolanamente squadrata con riempimento interno "muratura a sacco". Muratura composta da due paramenti realizzati con blocchi squadrati di pietra scaglia rosa con interposto riempimento con scaglie e detriti della stessa roccia. Paramento esterno più curato nei dettagli costruttivi e realizzato con elementi di dimensioni maggiori e più regolari rispetto al paramento interno. Tessitura muraria con rispetto dei filari orizzontali, sfalsamento parziale dei giunti verticali e assenza di diatoni.

Foto

Tipologia

Pietre a Spacco.

Schemi



		Analisi Statica			Analisi Sismica			
Parametri della Regola dell'Arte								
		NR	PR	R	NR	PR	R	Valutazioni quantitative
Presenza Diatoni	P.D.	•			•			☐ LMT trasversale: 120 cm
Malta Efficace	MA.	•			•			☑ Malta di pessima qualità
Forma Elementi	F.EL.		•			•		
Sfalsamento Giunti	S.G.		•			•		☐ LMT frontale: 188 cm
Resistenza Elementi	R.EL.			•			•	
Orizzontalità dei filari	OR.			•			•	
Dimensione Elementi	D.EL.		•			•		☐ Max dim. elementi: 35 cm

Indici di Qualità Muraria							
Azioni Verticali	IQM_V	4.50	B	3.15	B	$IQM_{FP} \leq 4$: Possibile disgregazione muraria con sismi di elevata intensità	
Azioni Fuori Piano	IQM_{FP}	4.00	C	2.80	C		
Azioni Nel Piano	IQM_{NP}	3.50	B	2.45	C		

Proprietà meccaniche [N/mm²]		IQM			IQM			NTC		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
Modulo elastico normale	E	1223	1479	1733	992	1201	1410	1500	1740	1980
Modulo di elasticità tangenziale	G	1223	1479	1733	992	1201	1410	1500	1740	1980
Resistenza media a compressione	f_m	2.521	3.282	4.032	1.938	2.561	3.176	2.600	3.200	3.800
Resistenza media a taglio (irregolare)	τ_0	0.042	0.056	0.069	0.034	0.044	0.054	0.056	0.065	0.074
Resistenza media a taglio (regolare)	f_{vm0}									

Figura 4. Scheda di Valutazione della Qualità Muraria

Il comando **IQMIndex** permette di accedere all'omonima applicazione web che implementa il metodo dell'Indice di Qualità Muraria, sviluppata da Aedes Software. L'applicazione permette di creare e salvare schede di valutazione della qualità muraria e presenta diversi video descrittivi del metodo IQM.

Il comando **Guida** consente l'accesso al Manuale per la valutazione dell'Indice di Qualità Muraria (IQM) a cura di Antonio Borri e Alessandro De Maria.

Una volta completata la valutazione della Qualità Muraria nella finestra dedicata al metodo IQM, è possibile **applicare le modifiche** alla muratura esistente in esame.

Nelle proprietà della muratura esistente vengono quindi riportati i valori dei moduli elastici e delle resistenze distinti per Analisi Statica e Analisi Sismica. L'Utente può scegliere se considerare i valori minimi, medi o massimi dell'intervallo di riferimento IQM, coerentemente con il Livello di conoscenza raggiunto.

Nota. In caso di Valutazione IQM, nelle proprietà degli elementi strutturali (maschi, colonne e fasce murarie) le caratteristiche costruttive relative allo Stato di Fatto (malta buona, malta scadente, ricorsi, connessioni trasversali, nucleo scadente) sono disabilitate. Nel metodo IQM, infatti, queste caratteristiche sono tutte racchiuse nel giudizio espresso in merito al rispetto della regola dell'arte dei vari parametri esaminati.

1.2 RIFERIMENTI

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

[2] A. Borri, M. Corradi, A. De Maria: The Failure of Masonry Walls by Disaggregation and the Masonry Quality Index. Heritage 2020, 3(4), 1162-1198. ; https://doi.org/10.3390/heritage3040065 - 22 Oct. 2020.

[3] A. Borri, A. De Maria: Indice di Qualità Muraria (IQM) e correlazione con le caratteristiche meccaniche. ReLUIS 2015 – Report WP1_1-1_2015UNIPG. In precedenza disponibile sul sito ReLUIS all'indirizzo:
http://www.reluis.it/images/stories/divulgazione/WP1_1-1_2015UNIPG_IQM_Report.pdf
http://www.reluis.it/images/stories/divulgazione/WP1_1-1_2015UNIPG_IQM_Allegati .pdf
come indicato in:
https://www.ingenio-web.it/pdfs/metodo-iqm-borri-anidis-2019.pdf

2 VERIFICA DI DISGREGAZIONE MURARIA

Aedes.PCM 2025 introduce la verifica di disgregazione muraria per gli edifici esistenti, un aspetto determinante nel caso di murature storiche dove si rileva una qualità muraria mediocre con scarsa consistenza della malta.

Il fenomeno della disgregazione è evidenziato nei contenuti della Normativa Tecnica.
In §C.8.7.1 le NTC18 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, come evidenziato in [3], 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 rigidezze) Presenza di effetti torcenti globali	Analisi non lineare su modello 3D	Migliorare resistenza e capacità deformativa degli elementi resistenti

Tabella 1. 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.

Ancora in [3], cui si rimanda per ogni approfondimento, si evidenzia come il valore dell'indice di qualità muraria fuori piano (IQM_{FP}) condensa in sé il rispetto o meno di quelle regole dell'arte rivolte ad ottenere un comportamento di tipo monolitico. Gli Autori specificano che "*per individuare un possibile valore di soglia per IQM_{FP} che possa indicare una maggiore o minore propensione di una tipologia muraria al fenomeno della disgregazione sono state considerate le tipologie murarie previste dalle norme tecniche italiane, cercando di distinguere le situazioni per le quali sono stati osservati, nei terremoti recenti, frequenti casi di disgregazione muraria, da quelle per le quali sono stati osservati invece cinematismi relativi a meccanismi locali/globali senza disgregazione muraria*".
Vengono quindi prese in considerazione le varie tipologie murarie considerate nella normativa italiana. La Tab.C8.5.I fornisce i valori dei parametri meccanici "di base", che corrispondono a condizioni definite dalla norma stessa (tessitura a regola d'arte, paramenti scollegati, malta di calce di modeste caratteristiche, assenza di ricorsi, assenza di interventi di consolidamento) a partire dai quali è possibile tenere conto di situazioni diverse ricorrendo ai coefficienti correttivi definiti da un'ulteriore tabella (Tab. C8.5.II).

Per ciascuna tipologia muraria possono essere applicati dei parametri amplificativi, nei casi seguenti: malta di buone caratteristiche, presenza di ricorsi (o listature), presenza sistematica di elementi di collegamento trasversale tra i paramenti. Inoltre, è possibile tener conto dei casi in cui la malta sia particolarmente scadente (nel seguito definita "di pessima qualità") e, per le murature in mattoni, di una eventuale ampiezza eccessiva dei giunti di malta.

In [3] gli Autori, tenendo come riferimento le varie tipologie proposte nella normativa italiana, e sulla base delle esperienze condotte nei rilevamenti post sismici dei vari terremoti italiani, hanno proposto di utilizzare, per gli edifici ordinari posti in zone con pericolosità sismica medio-alta, il valore di $IQM_{FP}=4$ come valore di soglia. **Valori di IQM_{FP} eguali od inferiori a 4 indicano la possibilità di manifestazione di fenomeni disgregativi.**

Nella figura seguente (tratta da [3]) sono riportati, per ciascuna tipologia muraria, i valori dell'indice 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 di scarsa qualità (murature irregolari prive di connessione o regolari prive di connessione e malta pessima) si trovano quasi tutte sotto a tale linea. Come espresso dagli Autori, "*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.*"

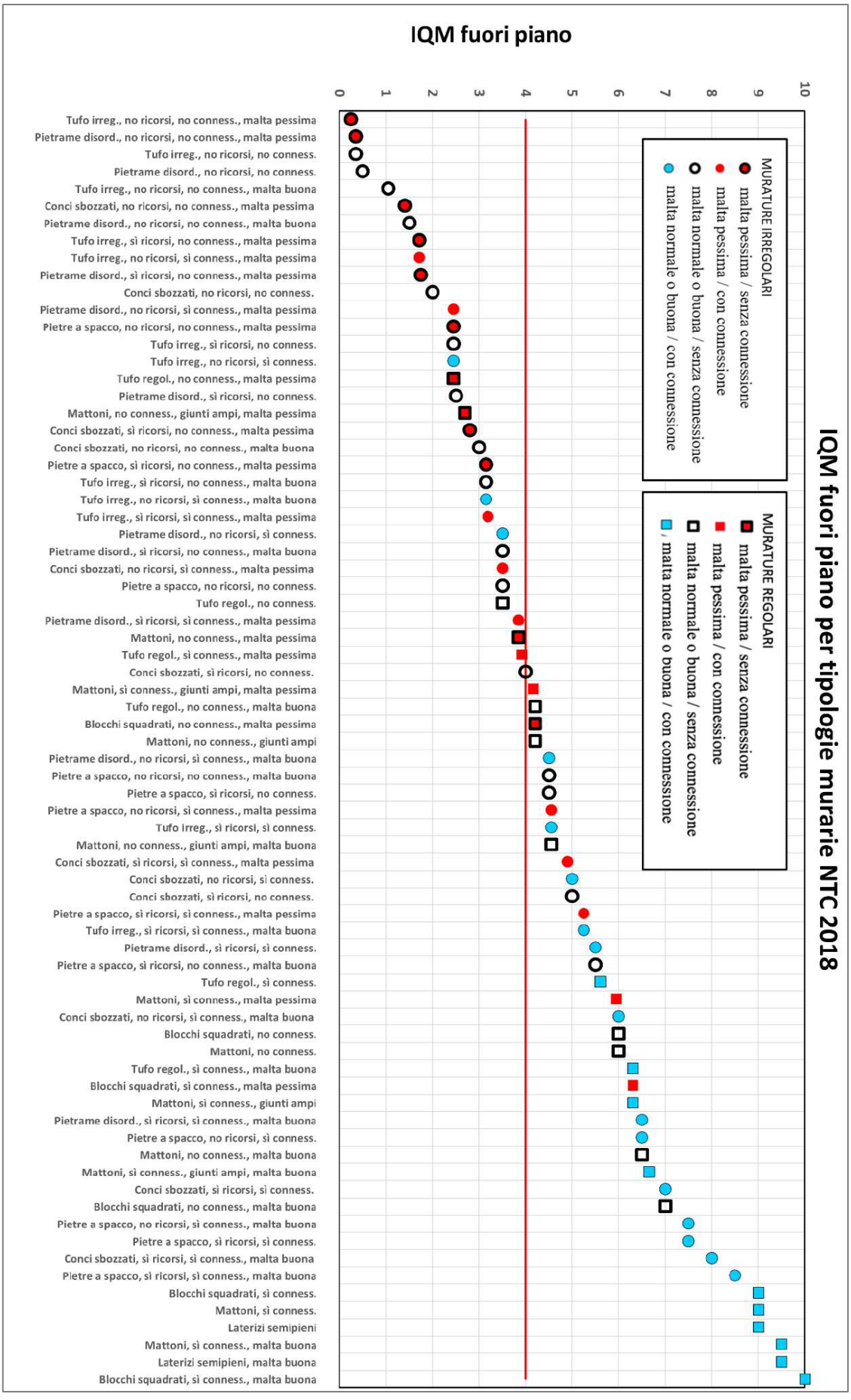


Figura 5. Valori dell'indice IQMFP per le murature contemplate nella normativa

La caratterizzazione completa del fenomeno della disgregazione richiede ulteriori considerazioni.
Come specificato dagli Autori del metodo IQM, **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 g.
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 può essere caratterizzata nelle valutazioni analitiche riservando l'esecuzione della verifica di disgregazione alle pareti esterne.

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 spettrale 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:

$$a_z(Z) = S_e(T_1, \xi) \cdot \gamma_1 \cdot \psi_1(z) \cdot \sqrt{1 + 0.0004\xi^2}$$

dove:

- T_1 è il periodo fondamentale di vibrazione della costruzione. T_1 può essere stimato attraverso la relazione [C7.3.2]: $T_1 = C_1 H^{3/4}$, con C_1=0.050 per costruzioni in muratura e H altezza dell'edificio in metri. In alternativa, può essere determinato con un'analisi modale: in questo caso tra le direzioni X e Y viene scelto il periodo di vibrazione fondamentale che corrisponde alla massima accelerazione spettrale. In Aedes.PCM, il valore di T_1 considerato nella verifica di disgregazione segue la scelta operata nei Parametri di Calcolo nella sezione dedicata all'Analisi Sismica Statica Lineare;
- $S_e(T_1)$ è lo spettro di risposta elastico valutato per il periodo T_1 e smorzamento viscoso ξ (ad es. 5%);
- γ_1 è il coefficiente di partecipazione modale del modo fondamentale di vibrazione che può essere assunto come $\gamma = 3N/(2N+1)$ con N numero di piani della costruzione [C7.2.10].
- $\psi_1(z)$ è il valore della forma modale fondamentale alla quota z, posto pari a z/H.

L'accelerazione spettrale a_z deve essere comunque non inferiore all'accelerazione al suolo PGA.

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 infatti un aspetto rilevante nei confronti della possibile disgregazione: i danni sismici hanno mostrato vari casi,

documentati nei riferimenti bibliografici, dove **la disgregazione si è manifestata in pareti dei piani più alti, laddove l'accelerazione assume i valori più elevati**.

Tutto ciò premesso, la verifica nei confronti della disgregazione in Aedes.PCM viene condotta con le seguenti modalità.

• **Ogni parete viene caratterizzata in base alla propensione alla disgregazione**: si utilizza l'Indice di Qualità Muraria fuori piano (IQM_{FP}) del materiale costitutivo, e se inferiore a 4 la possibile disgregazione è un comportamento da prendere in considerazione nella valutazione della sicurezza. Se IQM non viene calcolato, si fa riferimento alla tabella sopra riportata, costruita in base alle tabelle C8.5.I e C8.5.II inclusi quindi gli eventuali parametri correttivi della proprietà meccaniche. La tipologia del materiale della parete identifica se la parete può o meno essere soggetta a disgregazione: in tal caso, si indica qualitativamente IQM fuori piano ≤ 4.

• **Per ogni parete avente $IQM_{FP} \leq 4$, viene valutata l'accelerazione strutturale di progetto alla base della parete stessa**, definita attraverso lo spettro di piano che considera i dati sismici del sito di ubicazione, la posizione della parete lungo l'elevazione dell'edificio e le proprietà dinamiche dell'edificio stesso.

• **Se l'accelerazione strutturale è maggiore della soglia prefissata in input come valore che può innescare il fenomeno disgregativo, la verifica di disgregazione non è soddisfatta.**

Identificando l'accelerazione di soglia per la disgregazione come 'capacità', e l'accelerazione strutturale che investe la parete come 'domanda', considerando che entrambe queste accelerazioni sono riconducibili alla PGA al suolo, si può definire un coefficiente di sicurezza dato dal rapporto tra capacità e domanda in termini di PGA: tale coefficiente coincide con l'indicatore di rischio sismico ζ_E, che assume quindi un valore specifico per ogni maschio murario. Il minimo fra tutti identifica la capacità dell'edificio nei confronti della disgregazione: tale meccanismo viene inserito nella gerarchia dei comportamenti strutturali, nell'àmbito della sintesi dei risultati riguardante la verifica di sicurezza dell'edificio.

2.1 IMPLEMENTAZIONE IN AEDES.PCM

La verifica di Disgregazione muraria viene eseguita in fase di modellazione strutturale con riferimento allo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV). Si tratta di una verifica interattiva che viene automaticamente rieseguita ogni qual volta interviene una modifica che ne condiziona il risultato.

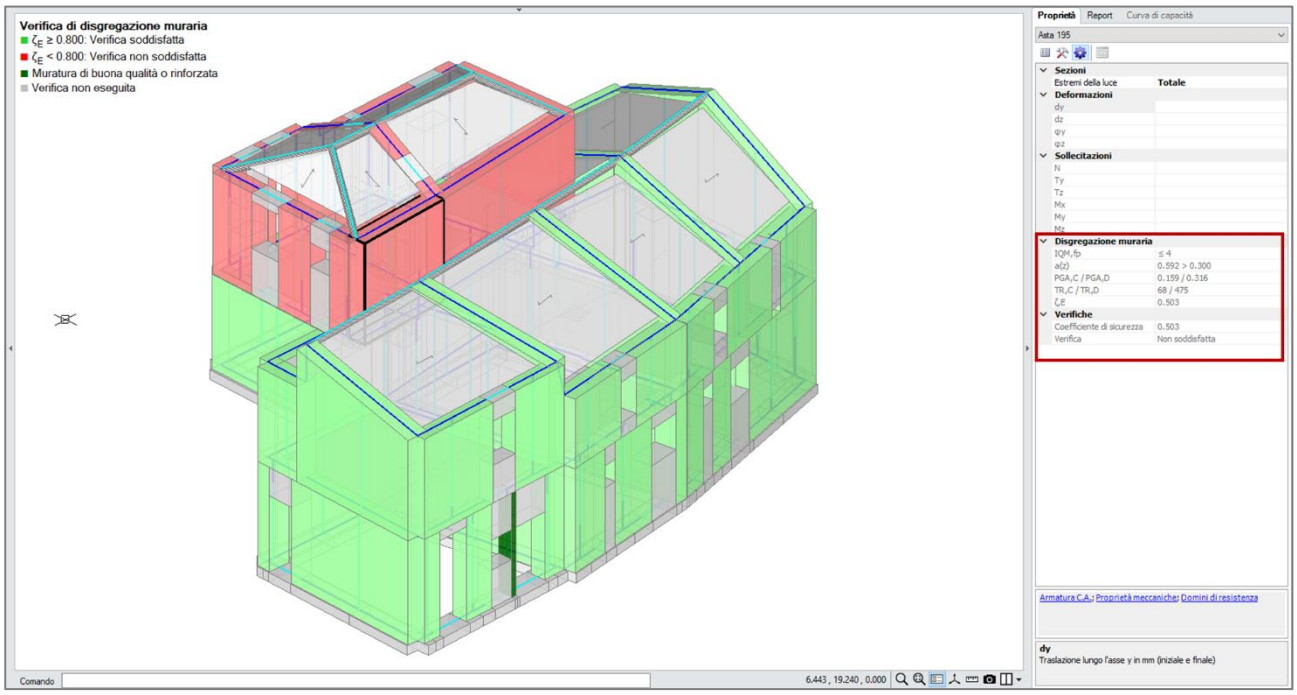


Figura 6. Verifica di Disgregazione muraria

La verifica può essere attivata o disattivata nelle proprietà del singolo maschio murario, gruppo Verifiche. Se il materiale associato al maschio selezionato non è una muratura esistente la verifica non viene comunque eseguita. Invece, se la muratura è rinforzata attraverso un qualsiasi intervento di consolidamento presente nella scheda Interventi, la verifica è automaticamente soddisfatta.

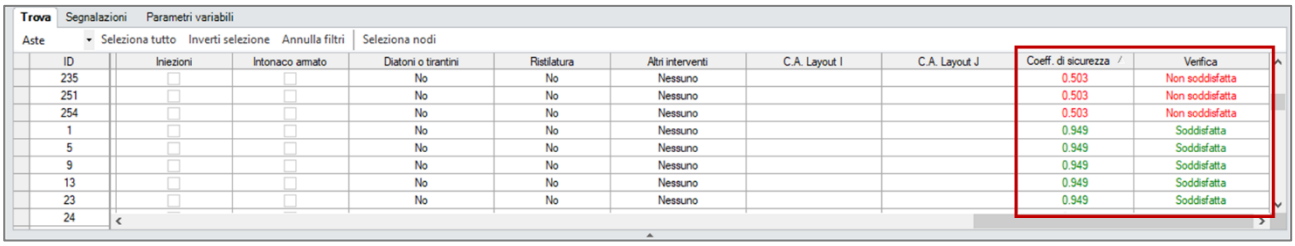
Per i maschi murari sottoposti a verifica di disgregazione, nella griglia delle proprietà, scheda Risultati, si nota un gruppo denominato "Disgregazione Muraria" che contiene i seguenti parametri:

IQM_{FP}	Riporta il valore dell'Indice di Qualità Muraria per azioni Fuori Piano. In assenza di valutazione della qualità muraria con metodo IQM, l'indice viene comunque stimato in funzione della tipologia muraria e delle caratteristiche costruttive specificate. Viene quindi indicato se l'indice IQM_{FP} è maggiore o minore/uguale a 4. La verifica di disgregazione è automaticamente soddisfatta per $IQM_{FP}>4$.
a(Z)	Accelerazione spettrale alla quota di base della parete. Il valore è confrontato con l'accelerazione di attivazione della disgregazione (a_{DSG}) specificata in Parametri di Calcolo > scheda Sismica.
PGA_C / PGA_D	Rapporto tra capacità e domanda in termini di PGA (per SLV).
TR_C / TR_D	Rapporto tra capacità e domanda in termini di TR (per SLV).

ζ_E	Indicatore di rischio sismico in termini di PGA. Questo valore determina lo stato della verifica. Se è minore dell'obiettivo in termini di ζ_E la verifica è soddisfatta, viceversa non è soddisfatta. Se la verifica di Disgregazione muraria è la verifica correntemente rappresentata nella finestra grafica, il risultato della verifica risulta evidente dalla colorazione del maschio murario e dalle indicazioni contenute nel sottostante gruppo "Verifiche".

Attivando il pulsante "Verifica di Disgregazione" presente nella Barra multifunzione > Scheda Struttura, la verifica di Disgregazione viene rappresentata nella finestra grafica attraverso la colorazione degli elementi strutturali. La leggenda (attivabile con il tasto F11) chiarisce il significato della colorazione. Dal menu a tendina associato al pulsante "Verifica di Disgregazione" è possibile attivare la visualizzazione degli Indicatori ζ_E per tutti i maschi soggetti a verifica.

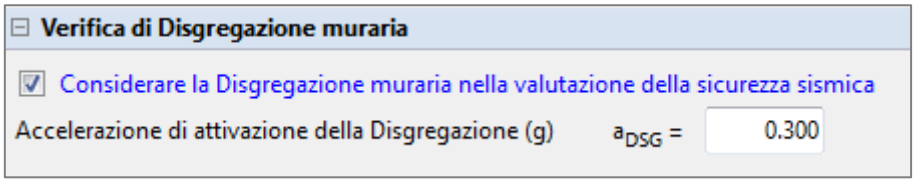
Lo stato della verifica di Disgregazione e il relativo valore dell'Indicatore di Rischio Sismico per ogni maschio murario può essere consultato anche nella tabella Trova a patto che la verifica di Disgregazione sia la verifica correntemente rappresentata in grafica.



ID	Iniezioni	Intonaco armato	Diatoni o tirantini	Ristilatura	Altri interventi	C.A. Layout I	C.A. Layout J	Coeff. di sicurezza	Verifica
235			No	No	Nessuno			0.503	Non soddisfatta
251			No	No	Nessuno			0.503	Non soddisfatta
254			No	No	Nessuno			0.503	Non soddisfatta
1			No	No	Nessuno			0.949	Soddisfatta
5			No	No	Nessuno			0.949	Soddisfatta
9			No	No	Nessuno			0.949	Soddisfatta
13			No	No	Nessuno			0.949	Soddisfatta
23			No	No	Nessuno			0.949	Soddisfatta
24									

Figura 7. Tabella "Trova" con indicazioni relative alla verifica di Disgregazione (stato di verifica e ζ_E)

In Parametri di calcolo, scheda Sismica sono presenti due parametri relativi alla verifica di Disgregazione muraria:



Il primo parametro riguarda la valutazione della sicurezza sismica di un edificio esistente e permette di considerare oppure no il comportamento di Disgregazione muraria.

Il secondo parametro è l'accelerazione di attivazione della Disgregazione che nella verifica viene confrontata con l'accelerazione spettrale alla base di ogni maschio murario.

Se si sceglie di considerare la disgregazione muraria nella valutazione della sicurezza, il **report** relativo agli Indicatori di rischio sismico riporterà nella gerarchia dei comportamenti strutturali il minimo indicatore ζ_E associato al comportamento di disgregazione muraria. Inoltre, l'indicatore di rischio sismico complessivo relativo allo SLV terrà conto di questo comportamento.

Gerarchia dei comportamenti strutturali
Indicatore di rischio sismico obiettivo: ζ_E >= **0.800**
Edificio esistente, Classe d'uso (§2.4.2): II
Verifiche obbligatorie secondo Normativa (§7.3.6, §8.3): SLV: RES
In grigio: comportamenti non analizzati, o da non considerare (cfr. §7.3.6, Tab.7.3.III)

Comportamento	ζ_E (PGA_C/PGA_D)
SLV: Resistenza nel piano	**0.218**
SLV: Resistenza fuori piano	**0.218**
SLV: Cinematismo	**0.339**
SLO: Rigidezza (spostamenti)	**0.422**
SLD: Rigidezza (spostamenti)	**0.493**
SLV: Disgregazione muraria	**0.503**
SLV: Capacità limite in fondazione	**1.041**
SLD: Resistenza nel piano	0.493
SLD: Resistenza fuori piano	0.493
SLD: Capacità limite in fondazione	1.593
SLD: Cinematismo	

2.2 RIFERIMENTI

[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.

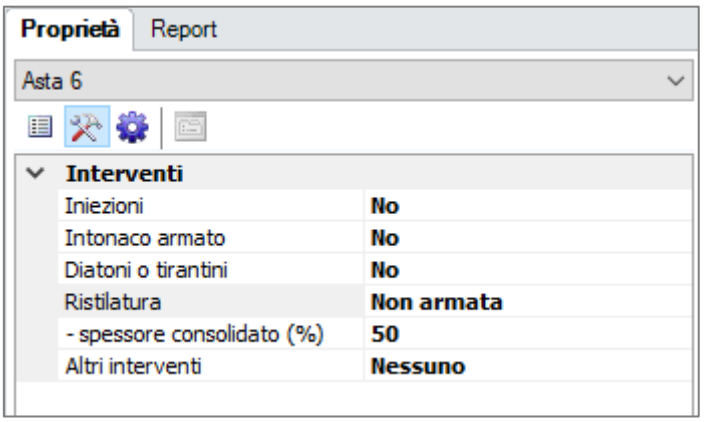
[2] Borri A., Corradi M., De Maria A.: The Failure of Masonry Walls by Disaggregation and the Masonry Quality Index, Heritage 2020, 3(4), 1162-1198.

[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.

3 INTERVENTO DI RISTILATURA NON ARMATA

Aedes.PCM 2025 introduce l'intervento di consolidamento attraverso ristilatura profonda dei giunti di malta, comunemente definito ristilatura non armata.

Nelle proprietà degli elementi strutturali in muratura esistente, scheda Interventi, è ora possibile attivare l'intervento di Ristilatura scegliendo tra Ristilatura Armata e Ristilatura Non armata.

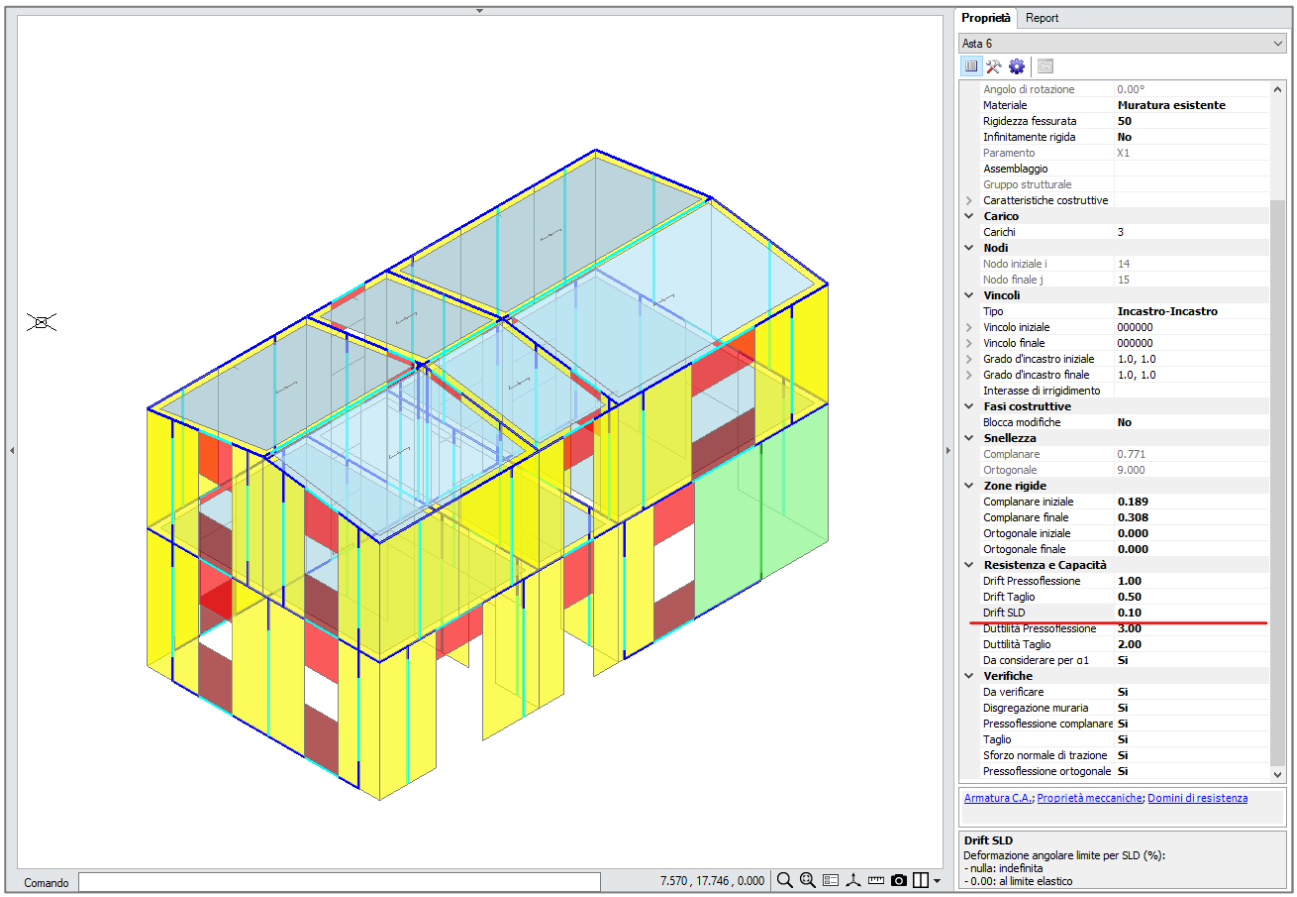


In caso di ristilatura armata, alle proprietà meccaniche della muratura viene applicato il relativo coefficiente correttivo specificato nelle proprietà del materiale in accordo con le indicazioni normative (NTC 2018, §C8.5.3.1).

In caso di ristilatura non armata dei giunti di malta, le proprietà meccaniche della muratura vengono incrementate applicando il coefficiente correttivo relativo alla malta di buona qualità, pesato sulla percentuale di spessore effettivamente consolidato.

4 DRIFT PER SLD LOCALE

Aedes.PCM 2025.2.4 introduce la possibilità di definire, per ciascun maschio murario, un punto di Stato Limite di Danno Locale (SLD locale) nell'ambito dell'analisi pushover.
Una nuova proprietà denominata **"Drift SLD"**, consente di impostare un limite di deformazione angolare oltre il quale si considera raggiunto l'SLD locale per il maschio murario.



Il comportamento della proprietà varia in funzione del valore assegnato:

- **Campo vuoto**: deformazione indefinita.
  In questo caso **non viene eseguito alcun controllo** sul raggiungimento di SLD locale.
- **Valore = 0.00**: deformazione al limite elastico.
  L'SLD locale si considera raggiunto al **superamento del limite elastico**, ovvero in corrispondenza della prima crisi per taglio o pressoflessione complanare.
- **Valore > 0.00**: deformazione angolare limite esplicita.
  L'SLD locale si considera raggiunto al **superamento della deformazione angolare specificata** (espressa in percentuale).

Per impostazione predefinita, il campo è vuoto, pertanto non viene applicato alcun limite aggiuntivo in termini di deformazione per SLD, oltre a quelli già previsti dalla normativa.

Durante l'**analisi pushover**, per ogni maschio con Drift SLD valorizzato (campo non vuoto), viene individuato il punto della curva di capacità corrispondente al raggiungimento dell'SLD locale.
Nel caso in cui lo spostamento relativo al primo SLD locale risulti inferiore alla capacità di spostamento dell'intera struttura associata agli Stati Limite di Danno (SLD) o di Operatività (SLO), determinati secondo le indicazioni della normativa vigente (*NTC 2018*, §C8.7.1.3.1 per edifici esistenti, §C7.8.1.5.4 per edifici nuovi), tali limiti globali vengono arretrati fino a coincidere con il punto di SLD locale.

4.1 ESTENSIONE DELLA VERIFICA SLD ALLO STATO LIMITE DI DANNO PER BENI ARTISTICI (SLA)

Grazie a questa nuova funzionalità, è ora possibile valutare anche la capacità di spostamento relativa allo **Stato Limite di Danno per Beni Artistici (SLA)**, in accordo con le indicazioni contenute nella **Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9.02.2011**, "*Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 14 gennaio 2008.*"

Riportiamo di seguito un estratto del documento (§2.3):
"*...possono sussistere ragioni di tutela di specifiche opere d'arte (affreschi, stucchi, ecc.), per la protezione delle quali è opportuno introdurre uno specifico Stato Limite di Danno ai beni artistici, **SLA**, così definito: a seguito di un terremoto di livello opportuno (in genere quello preso in considerazione per lo stato limite di danno), i beni artistici contenuti nel manufatto, intesi come apparati decorativi, superfici pittoriche, elementi architettonici di pregio (altari, organi, balaustre, pavimentazioni, ecc.) nonché beni mobili pertinenziali (pale d'altare, fonti battesimali, statue, ecc.) subiscono danni di modesta entità, tali da poter essere restaurati senza una significativa perdita del valore culturale.*
[...]
In genere i danni agli apparati decorativi diventano significativi e non accettabili in presenza di danni gravi agli elementi strutturali, quelli che vengono presi come riferimento per decidere in merito all'agibilità della costruzione. In questi casi, per le verifiche dello SLA possono essere adottati i modelli di verifica dello SLD, precisando specifici valori limite per fessurazioni e deformazioni."

Pertanto, grazie alla proprietà "Drift SLD", è possibile definire un limite di deformazione angolare per maschi murari contenenti elementi decorativi di pregio, come ad esempio affreschi o stucchi.
Quando tale limite viene superato, la capacità di spostamento per SLD viene arretrata, e la verifica dell'SLA può essere condotta in analogia alla verifica dell'SLD, semplicemente definendo valori di soglia più restrittivi, specificamente calibrati per la tutela del bene artistico.