

EFFETTI SISMICI E DISGREGAZIONE MURARIA: UNA VERIFICA FONDAMENTALE RICHIESTA DALLA NORMATIVA

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

- I danni rilevati in seguito agli eventi sismici hanno evidenziato l'importanza del **fenomeno della disgregazione muraria**, meccanismo di collasso che può manifestarsi in edifici in muratura di media o scarsa qualità sottoposti ad eventi sismici rilevanti. **Il meccanismo di disgregazione è esplicitamente evidenziato nei contenuti nella Normativa Tecnica** nell'ambito del percorso di valutazione della sicurezza.
- Il metodo dell'**Indice di Qualità Muraria (IQM)** per la valutazione della qualità meccanica delle murature ha tra le varie finalità quella di valutare la maggiore o minore propensione di una muratura al fenomeno della disgregazione.
- **La verifica di disgregazione muraria deve tenere conto sia della qualità muraria che dell'intensità dell'accelerazione sismica** che investe le singole pareti alle diverse quote dell'edificio. Il risultato è un **indicatore di rischio sismico ζ_E relativo al fenomeno di disgregazione muraria** che condiziona la valutazione della capacità allo stato di fatto e di conseguenza la definizione dei necessari interventi di consolidamento.



EFFETTI SISMICI: DISGREGAZIONE MURARIA



VALUTAZIONE DELL'INDICE DI QUALITA' MURARIA

Muratura

Tipologia: Pietre a Spacco

Descrizione: Muratura di blocchi di pietra scaglia grossolanamente squadrate con riempimento interno "muratura a sacco". Muratura composta da due paramenti realizzati con blocchi squadrate 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

Analisi Statica

Parametri della Regola dell'Arte	NR	PR	R	NR	PR	R
Presenza Datumi	P.D.					
Mala Efficace	MA					
Forma Elementi	F.E.L.					
Sfalsamento Giusti	S.G.					
Resistenza Elementi	R.E.L.					
Orizzontalità dei filari	OR.					
Dimensione degli elementi	D.E.L.					

Indice di Qualità Muraria

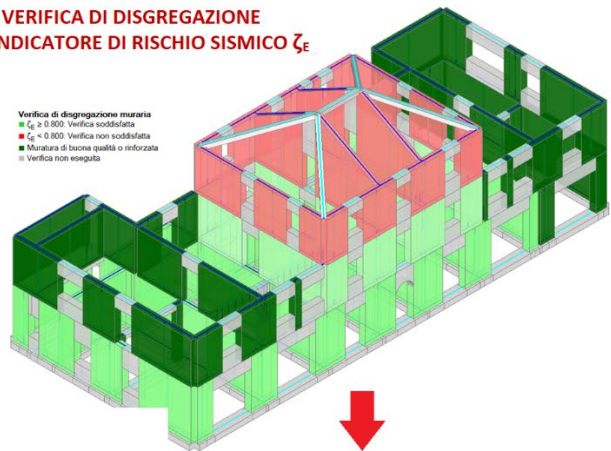
Azioni Verticali	IQM _v	4.50	B	3.15	B
Azioni Fuori Piano	IQM _{fp}	4.00	C	2.80	C
Azioni Nel Piano	IQM _{np}	3.50	B	2.45	C

Valutazioni quantitative

- Linea di Mirino Tracciato trasversale (cm) 120
- Mala di pessima qualità
- Linea di Mirino Tracciato frontale (cm) 188
- Paramento B 188
- Dimensione massima degli elementi (cm) 25

IQM_{np} ≤ 4 → Possibile disgregazione muraria con sismi di elevata intensità

VERIFICA DI DISGREGAZIONE CON INDICATORE DI RISCHIO SISMICO ζ_E



DISGREGAZIONE MURARIA nella NORMATIVA TECNICA

CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP.

CS.7.12.1 Analisi dei meccanismi locali di corpo rigido

In generale, ogni meccanismo locale di corpo rigido può essere descritto da un insieme di blocchi murari, che possono essere considerati indeformabili, tra loro collegati attraverso vincoli interni (scossesismi, quali ad esempio cerniere o bielle, che lasciano liberi uno o più gradi di libertà relativi) ed elementi di connessione (rigidi o elastici, fissi o attritivi), che simulano l'eventuale presenza di catene metalliche, travi o ammassamenti murari; sono inoltre presenti vincoli esterni che simulano il collegamento della porzione interessata dal meccanismo con il resto della costruzione.

Per le verifiche che seguono, l'insieme di tali vincoli deve essere tale da costituire una catena cinematica a un grado di libertà, il cui atto di moto può essere descritto da un parametro di spostamento (o rotazione) virtuale infinitesimo. 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.

GERARCHIA DEI COMPORIMENTI STRUTTURALI

Gerarchia dei comportamenti strutturali

Indicatore di rischio sismico obiettivo: $\zeta_E \geq 0.800$

Edificio esistente. Classe d'uso (S2.4.2); II

Verifiche obbligatorie secondo Normativa (S7.3.6, S8.3); SLV: RES

In grigio: comportamenti non analizzati, o da non considerare (cfr. S7.3.6, Tab.7.3.III)

Compartimento	ζ_E (PGA/PGA ₀)
SLV: Disgregazione muraria	0.482
SLV: Cinematismo	0.500
SLV: Resistenza fuori piano	0.695
SLV: Resistenza nel piano	0.695

INDICE

[1. Introduzione](#)

[2. Indicazioni Normative: Gerarchia dei Meccanismi](#)

[3. Metodo dell'Indice di Qualità Muraria \(IQM\)](#)

[4. Verifica di Disgregazione Muraria](#)

[5. Implementazione nel software Aedes.PCM](#)

[5.1. Indici di Qualità Muraria](#)

[5.2. Verifica di Disgregazione Muraria](#)

[5.3. Caso Studio](#)

[Conclusioni](#)

[Bibliografia di Riferimento](#)

1. INTRODUZIONE

Le costruzioni storiche italiane rappresentano un patrimonio di valore inestimabile, ma sono spesso esposte a gravi danni e perdite a causa dei terremoti.

Gli eventi sismici che hanno interessato l'Italia Centrale nel 2016 hanno evidenziato quanto sia cruciale, per la risposta strutturale di un edificio, la qualità meccanica delle sue murature. Questa dipende da specifiche caratteristiche costruttive, come i materiali utilizzati, la tessitura, l'organizzazione della sezione e altri elementi che incidono profondamente sul comportamento strutturale.

È emerso chiaramente che gli edifici hanno reagito in modo diverso proprio in base alla qualità delle murature: nelle aree prossime agli epicentri, molte costruzioni con murature disordinate e irregolari hanno subito crolli totali o parziali per disgregazione. Al contrario, le strutture realizzate con murature ben progettate e costruite a regola d'arte, oppure adeguatamente consolidate (come nel caso del centro storico di Norcia), hanno mostrato in generale una buona capacità di resistere al sisma.



Effetti del sisma a Pescara del Tronto



Effetti del sisma ad Accumoli e Castelluccio di Norcia

Fig. 1. Effetti disgregativi dovuti agli eventi sismici in Italia Centrale, 2016 (da [1])

Nelle immagini di fig. 1 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 [1].

I danni rilevati in seguito agli eventi sismici hanno evidenziato quanto sia importante tenere in considerazione il **fenomeno della disgregazione muraria**, soprattutto nella valutazione della sicurezza e nella progettazione di interventi di consolidamento di edifici in muratura situati in aree ad alto rischio sismico. Questo aspetto è chiaramente evidenziato nei contenuti nella Normativa Tecnica italiana.

Il metodo dell'**Indice di Qualità Muraria (IQM)** per la valutazione della qualità meccanica delle murature ha tra le varie finalità quella di valutare la maggiore o minore propensione di una muratura al fenomeno della disgregazione. La disgregazione si manifesta in casi di scarsa qualità muraria e sotto l'effetto di un'accelerazione sismica di intensità sufficientemente elevata.

La **Verifica di Disgregazione muraria** proposta nel presente studio e implementata in un software professionale si basa proprio su questi due aspetti: qualità muraria e intensità dell'accelerazione sismica. Il risultato è un indicatore di rischio sismico ζ_e relativo al fenomeno di disgregazione muraria che condiziona la valutazione di sicurezza sismica di un edificio esistente così come la progettazione degli interventi di consolidamento.

2. 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, come evidenziato in [4], 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

Tab. 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.**

3. METODO DELL'INDICE DI QUALITÀ MURARIA (IQM)

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 [2, 3, 4, 5] 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 ReLUIIS. Il metodo 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 indici numerici che appaiono ben correlati 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**, un aspetto determinante nel caso di murature storiche dove si rileva una qualità mediocre con una scarsa consistenza della malta.

In [4], 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 delle NTC2018 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 [4] 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 [4]) 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.”**

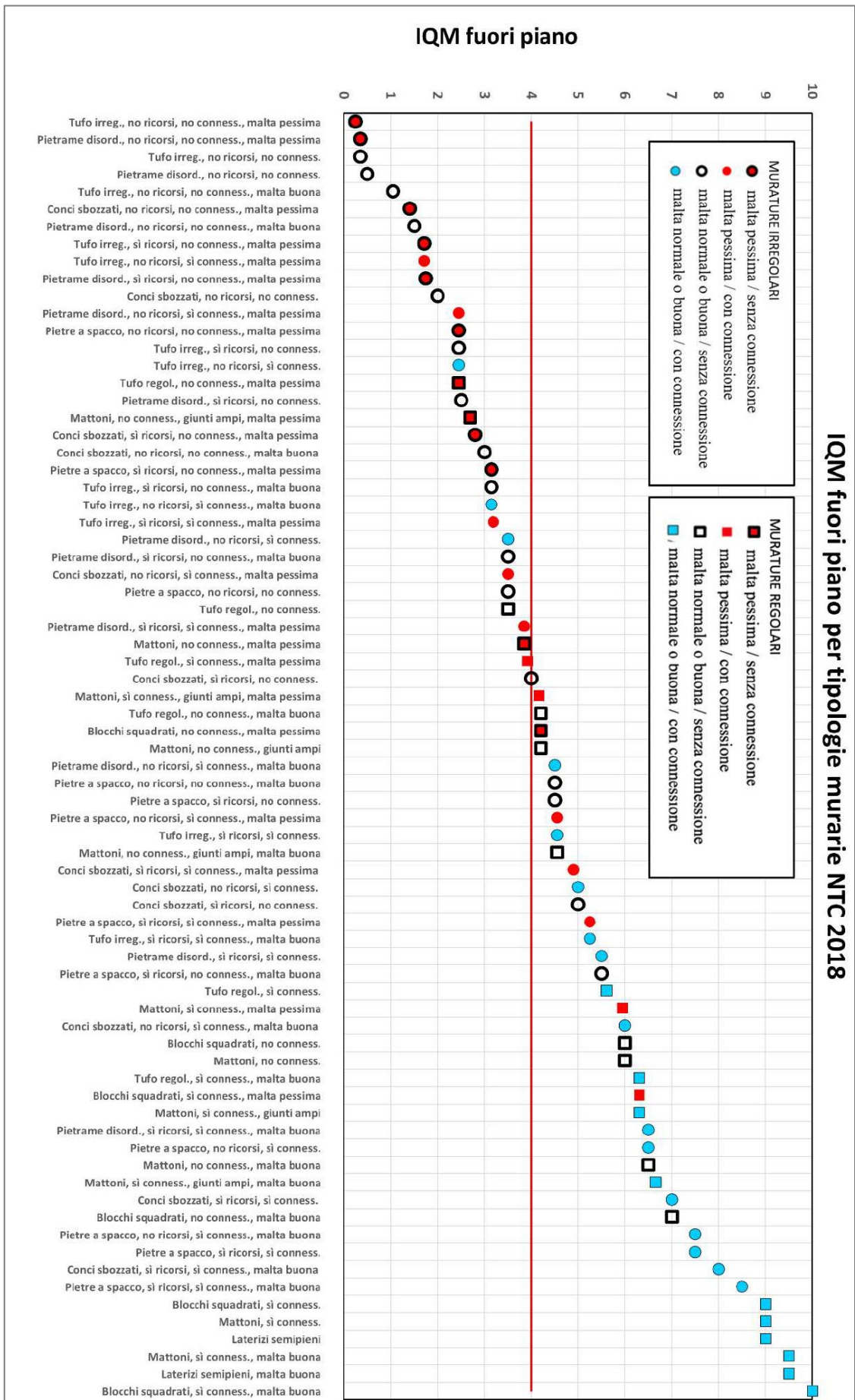


Fig. 2. Valori dell'indice IQM_{FP} per le murature contemplate nella normativa

4. VERIFICA DI DISGREGAZIONE MURARIA

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 (NTC2018, §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.

$S_e(T_1)$ 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 può essere 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 al grafico in Figura 1, costruito 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 caratterizzata da $IQM_{FP} \leq 4$, 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'ambito della sintesi dei risultati riguardante la verifica di sicurezza dell'edificio.

5. IMPLEMENTAZIONE NEL SOFTWARE AEDES.PCM

Nei paragrafi seguenti viene descritta l'implementazione del metodo IQM e della verifica di disgregazione muraria nel software di calcolo professionale Aedes.PCM [6]. Le fasi operative illustrate descrivono un percorso di verifica che più in generale può essere implementato in qualsiasi sistema di analisi di vulnerabilità che includa il meccanismo di disgregazione fra i comportamenti da esaminare per la valutazione della sicurezza.

Successivamente viene presentato un caso studio relativo alla valutazione della sicurezza sismica di un edificio esistente, dove il risultato complessivo in termini di indicatore di rischio sismico ζ_E è proprio condizionato dalla verifica di disgregazione muraria.

5.1 Indici di Qualità Muraria

Il metodo IQM per la valutazione della qualità meccanica delle murature è implementato in Aedes.PCM nella sezione dedicata alle proprietà delle murature esistenti.

Attivando l'opzione **Valutazione IQM**, i parametri meccanici della muratura, cioè i moduli di elasticità (E, G) e le resistenze medie a compressione e a taglio in assenza di sforzi normali (f_m , τ_0 , f_{vm0}) vengono determinati attraverso gli Indici di Qualità Muraria. Per accedere alla finestra dedicata al metodo IQM è sufficiente cliccare sul pulsante [...] che appare nel campo denominato **Indici di Qualità Muraria**.

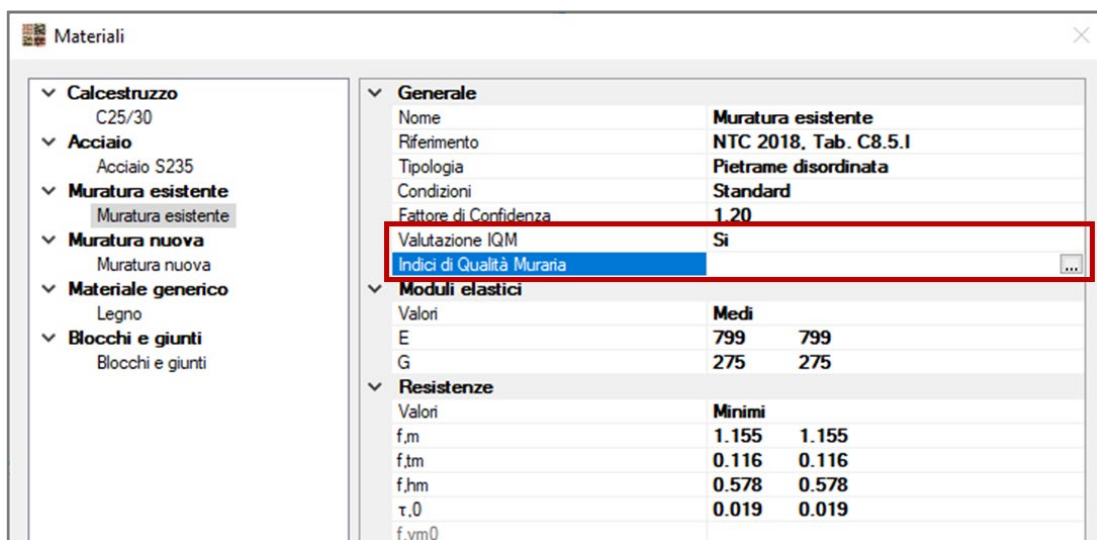


Fig. 3. Proprietà del materiale Muratura Esistente: Valutazione IQM

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

IQM

Importa da Libreria Crea Scheda IQMIndex Guida

Muratura

Tipologia: Pietre a Spacco

Descrizione e Schemi

Descrizione: Muratura di blocchi di pietra scaglia grossolanamente squadrata con riempimento interno "muratura a sacco". Muratura composta da due paramenti realizzati con blocchi squadrate 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...

Foto Assonometria Sezione Prospetto

Analisi Statica Analisi Sismica

Parametri della Regola dell'Arte

		NR	PR	R	NR	PR	R	Valutazioni quantitative	
Presenza Diatoni	P.D.	[Slider]			[Slider]			<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato trasversale (cm)	120
Malta Efficace	MA.	[Slider]			[Slider]			<input checked="" type="checkbox"/> Malta di pessima qualità	
Foma Elementi	F.EL.	[Slider]			[Slider]			<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato frontale (cm)	188
Sfalsamento Giunti	S.G.	[Slider]			[Slider]			Paramento B	188
Resistenza Elementi	R.EL.	[Slider]			[Slider]			<input type="checkbox"/> Dimensione massima degli elementi (cm)	35
Orizzontalità dei filari	OR.	[Slider]			[Slider]				
Dimensione degli elementi	D.EL.	[Slider]			[Slider]				

Indici di Qualità Muraria

		IQM _V			IQM _{FP}			IQM _{NP}		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
Azioni Verticali	IQM _V	4.50		B	3.15		B			
Azioni Fuori Piano	IQM _{FP}	4.00		C	2.80		C			
Azioni Nel Piano	IQM _{NP}	3.50		B	2.45		C			

$IQM_{FP} \leq 4 \rightarrow$ Possibile disgregazione muraria con sismi di elevata intensità

Proprietà meccaniche (N/mm²)

		IQM			IQM			NTC		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
Modulo di elasticità normale	E	1223	1479	1733	992	1201	1410	1500	1740	1980
Modulo di elasticità tangenziale	G	350	422	493	301	363	425	500	580	660
Resistenza media a compressione	fm	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)	fv0									

OK Annulla Applica

Fig. 4. Finestra dedicata al metodo degli Indici di Qualità Muraria

Nella sezione **Muratura** è possibile modificare la **tipologia** di muratura scegliendo una tra le otto tipologie considerate nella Tabella C8.5.I delle NTC2018.

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 sbazzati" 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 (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 è sufficiente specificare lo stesso valore in entrambi i campi.
- La dimensione degli elementi resistenti può essere valutata in funzione della **Dimensione massima degli elementi** prevalenti nella tessitura muraria.

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 **IQM_{FP}** sia ≤ 4 , un apposito messaggio indica la **possibile disgregazione muraria con sismi di elevata intensità**.

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 (NTC2018, Tabella C8.5.I).

Fra i comandi presenti nella finestra di IQM (fig. 4), 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 [5]. Possono essere importate tutte le informazioni della muratura oppure solo gli schemi (Assonometria, Prospetto, Sezione).



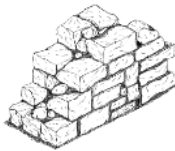
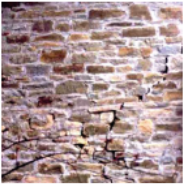


Libreria IQM						
Selezionare una muratura per importare: <input type="radio"/> gli schemi <input checked="" type="radio"/> tutte le informazioni						
N	Descrizione sintetica	IQMv	IQMfp	IQMnp	Schemi	Foto
7	Muratura di blocchi di pietra squadrata e ciottoli a doppio paramento.	1.50	1.50	1.00		
8	Muratura di blocchi di pietra sbazzata, ciottoli e pietrame a doppio paramento.	4.00	3.50	2.50		
9	Muratura di blocchi di pietra scaglia grossolanamente squadrata con riempimento interno "muratura a sacco".	4.50	4.00	3.50		

Fig. 5. Libreria IQM

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

Il comando **Crea Scheda** (cfr. fig. 4) 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

PDF

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 squadrate 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										
Presenza Diatoni	P.D.	•			•			Valutazioni quantitative		
Malta Efficace	MA.	•			•			<input type="checkbox"/> LMT trasversale: 120 cm		
Forma Elementi	F.EL.		•			•		<input checked="" type="checkbox"/> Malta di pessima qualità		
Sfalsamento Giunti	S.G.		•			•		<input type="checkbox"/> LMT frontale: 188 cm		
Resistenza Elementi	R.EL.			•			•			
Orizzontalità dei filari	OR.			•			•			
Dimensione Elementi	D.EL.		•			•		<input type="checkbox"/> Max dim. elementi: 35 cm		
Indici di Qualità Muraria										
Azioni Verticali	IQM_V	4.50	B		3.15	B		$IQM_{FP} \leq 4$:		
Azioni Fuori Piano	IQM_{FP}	4.00	C		2.80	C		Possibile disgregazione muraria con sismi di elevata intensità		
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)	T_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}									

Fig. 6. Scheda di Valutazione della Qualità Muraria

Attraverso il comando **IQMIndex** (cfr. fig. 4) si accede all'omonima applicazione web [7], accessibile a tutti i Professionisti, che implementa il metodo dell'Indice di Qualità Muraria. L'applicazione permette di creare e salvare schede di valutazione della qualità muraria indipendentemente dal software Aedes.PCM e propone diversi video descrittivi del metodo IQM.

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.

5.2 Verifica di Disgregazione Muraria

La verifica di Disgregazione muraria viene eseguita in Aedes.PCM 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.

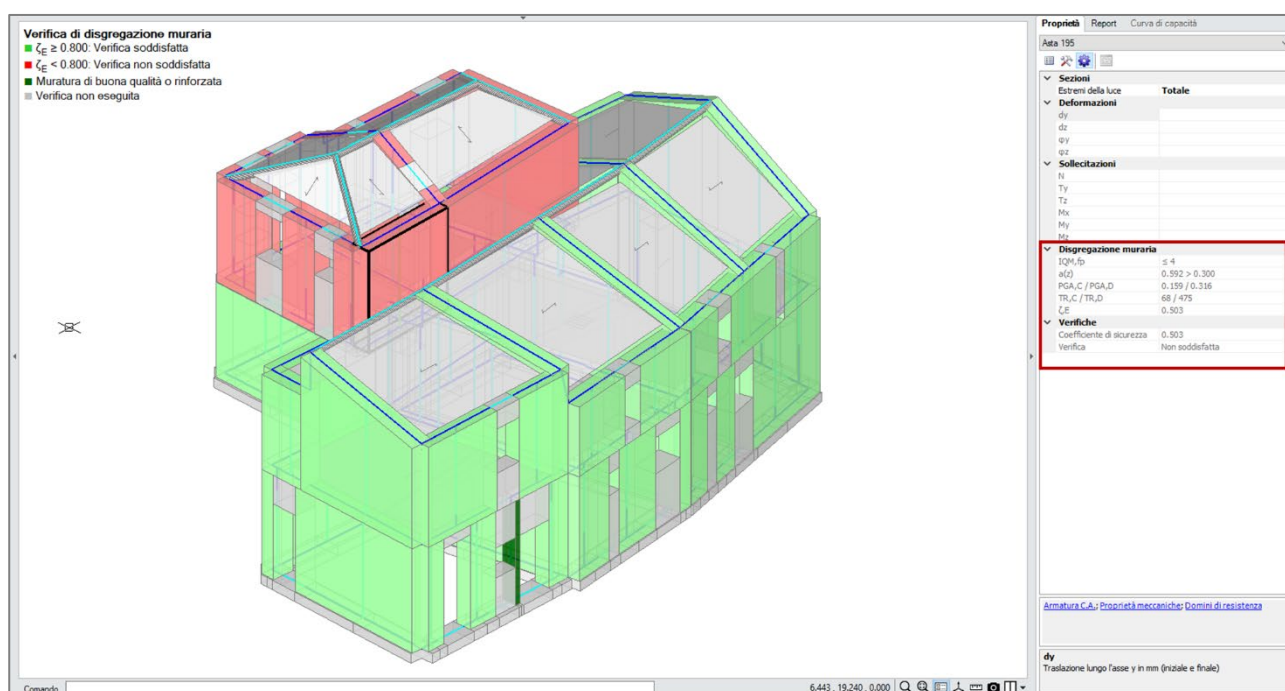


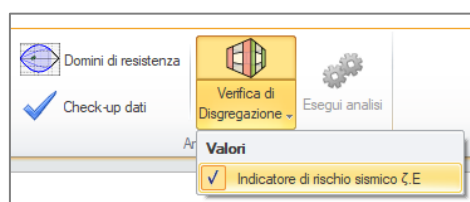
Fig. 7. Verifica di Disgregazione Muraria

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 parametri qui di seguito elencati.

IQM_{FP}	<p>Riporta il valore dell'Indice di Qualità Muraria per azioni Fuori Piano.</p> <p>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.</p> <p>La verifica di disgregazione è automaticamente soddisfatta per IQM_{FP}>4.</p>
a(Z)	<p>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.</p>
PGA_C / PGA_D	<p>Rapporto tra capacità e domanda in termini di PGA (per SLV).</p>
TR_C / TR_D	<p>Rapporto tra capacità e domanda in termini di TR (per SLV).</p>
ζ_E	<p>Indicatore di rischio sismico in termini di PGA.</p> <p>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.</p> <p>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".</p>

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.

Trova		Segnalazioni		Parametri variabili		Selezione nodi			
Aste	Seleziona tutto	Inverti selezione	Annulla filtri						
ID	Iniezioni	Intonaco amato	Diatori o tirantini	Ristilatura	Altri interventi	C.A. Layout I	C.A. Layout J	Coeff. di sicurezza /	Verifica
235	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	No	No	Nessuno			0.503	Non soddisfatta
251	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	No	No	Nessuno			0.503	Non soddisfatta
254	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	No	No	Nessuno			0.503	Non soddisfatta
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	No	No	Nessuno			0.949	Soddisfatta
5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	No	No	Nessuno			0.949	Soddisfatta
9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	No	No	Nessuno			0.949	Soddisfatta
13	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	No	No	Nessuno			0.949	Soddisfatta
23	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	No	No	Nessuno			0.949	Soddisfatta
24	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	No	No	Nessuno			0.949	Soddisfatta

Fig. 8. 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:

Verifica di Disgregazione muraria

Considerare la Disgregazione muraria nella valutazione della sicurezza sismica

Accelerazione di attivazione della Disgregazione (g) $a_{DSG} =$

Fig. 9. Parametri di calcolo 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: $\zeta_E \geq 0.800$	
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 (PGAc/PGA0)
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	

Fig. 10. Gerarchia dei comportamenti strutturali

5.3 Caso Studio

Si esamina ora il caso studio di un **edificio esistente in muratura** sito nel comune di Fivizzano (MS). L'edificio, rappresentato nella figura seguente, è costituito da tre piani fuori terra. La struttura portante originaria è realizzata in **muratura di conci sbozzati**, mentre una parte costruita in fase di ampliamento è realizzata in **muratura di mattoni pieni e malta di calce**.

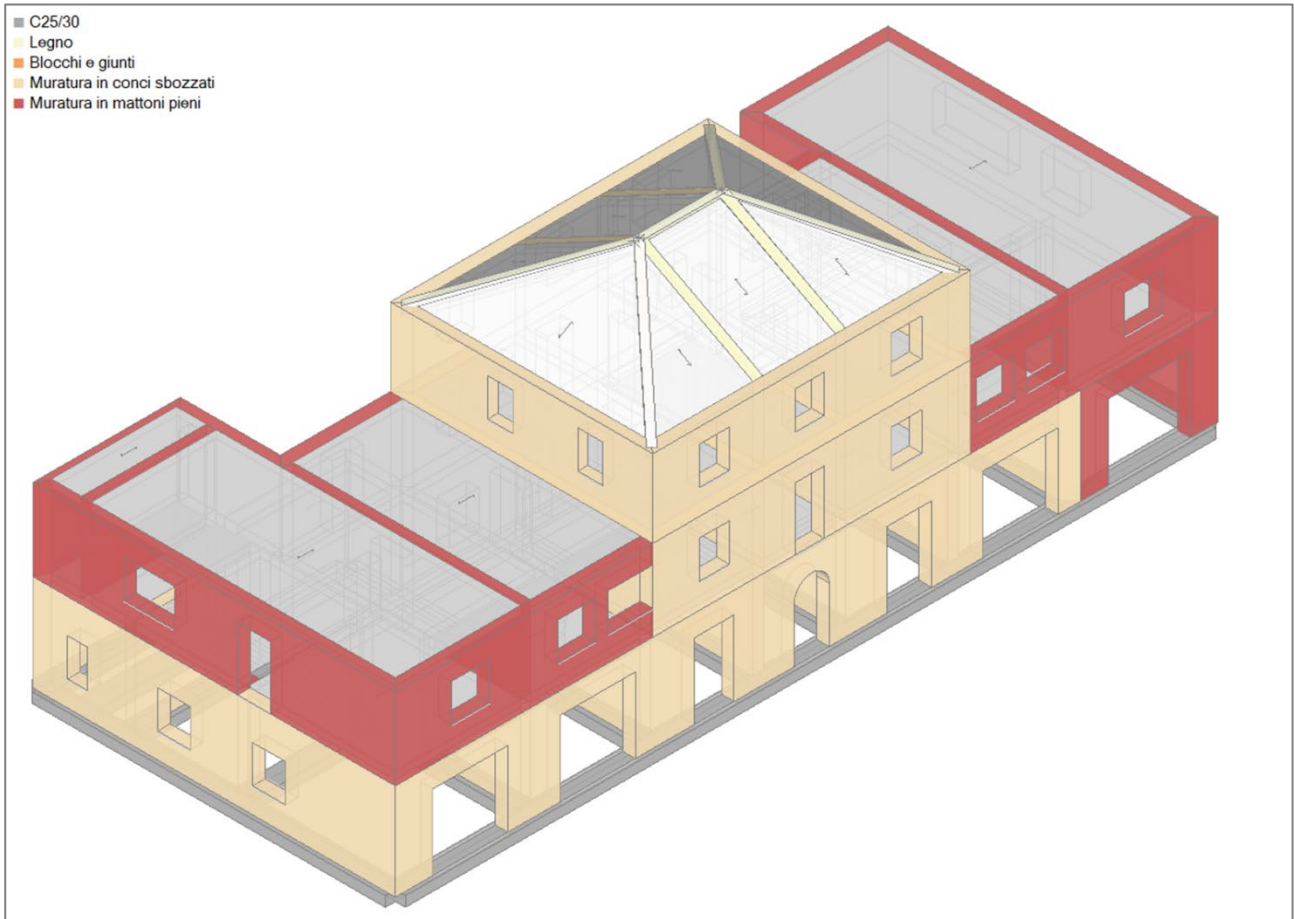


Fig. 11. Vista assonometrica dell'edificio oggetto di studio

Per questo edificio viene condotta la **valutazione della sicurezza sismica per mezzo del software Aedes.PCM.**

Trattandosi di un edificio in classe d'uso II viene preso in considerazione lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita. **La valutazione della sicurezza tiene conto dei seguenti meccanismi strutturali:**

- disgregazione muraria;
- meccanismi di collasso locale (cinematismi);
- comportamento globale della struttura che chiama in causa la resistenza dei pannelli murari nel piano e fuori piano.

Le proprietà meccaniche della muratura originaria in conci sbozzati vengono valutate attraverso il metodo dell'Indice di Qualità Muraria. In questo caso, la tipologia muraria in esame è molto simile a una delle murature presenti nella **Libreria IQM** messa a disposizione dal software; pertanto, tutte le informazioni (descrizione, schemi, giudizio sui parametri della regola dell'arte) vengono importate dalla Libreria e in particolare dalla scheda n. 13.

La figura seguente mostra le caratteristiche della muratura e i parametri relativi alla valutazione della qualità muraria.

IQM

Importa da Libreria Crea Scheda IQMIndex Guida

Muratura

Tipologia: Conci Sbozzati Sistematica presenza di zeppe profonde Descrizione e Schemi

Descrizione
Muratura di blocchi di pietra sbozzata e ciottoli con interposizione di pietrame e ciottolame. Muratura mista realizzata con elementi sbozzati di varie forme e dimensioni anche molto diverse tra loro, tessitura muraria non regolare. Filari non sempre orizzontali e sfalsamento dei giunti verticali approssimativo. Assenza di elementi trasversali (diatoni). La parete esterna presenta una accuratezza maggiore nella scelta e disposizione

Foto Assonometria Sezione Prospetto

Parametri della Regola dell'Arte

		Analisi Statica			Analisi Sismica			Valutazioni quantitative	
		NR	PR	R	NR	PR	R		
Presenza Diatoni	P.D.	[Slider]			[Slider]			<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato trasversale (cm)	110
Malta Efficace	MA.	[Slider]			[Slider]			<input type="checkbox"/> Malta di pessima qualità	
Foma Elementi	F.E.L.	[Slider]			[Slider]			<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato frontale (cm)	122 Paramento B 122
Sfalsamento Giunti	S.G.	[Slider]			[Slider]			<input type="checkbox"/> Dimensione massima degli elementi (cm)	30
Resistenza Elementi	R.E.L.	[Slider]			[Slider]				
Orizzontalità dei filari	OR.	[Slider]			[Slider]				
Dimensione degli elementi	D.EL.	[Slider]			[Slider]				

Indici di Qualità Muraria

Azioni	Indice	Statica	Sismica	Nota
Azioni Verticali	IQM_V	2.50	2.50	B
Azioni Fuori Piano	IQM_{FP}	2.00	2.00	C
Azioni Nel Piano	IQM_{NP}	2.50	2.50	C

$IQM_{FP} \leq 4 \rightarrow$ Possibile disgregazione muraria con sismi di elevata intensità

Proprietà meccaniche (N/mm²)

		IQM			IQM			NTC		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
Modulo di elasticità normale	E	897	1087	1277	897	1087	1277	1020	1230	1440
Modulo di elasticità tangenziale	G	303	366	428	303	366	428	340	410	480
Resistenza media a compressione	f_m	1.707	2.273	2.831	1.707	2.273	2.831	2.000	2.500	3.000
Resistenza media a taglio (irregolare)	τ_0	0.034	0.045	0.055	0.034	0.045	0.055	0.035	0.043	0.051
Resistenza media a taglio (regolare)	f_{v0}									

OK Annulla Applica

Fig. 12. Muratura in conci sbozzati: Valutazione IQM

In funzione dei giudizi assegnati ai parametri della regola dell'arte si ottengono i seguenti valori degli indici di qualità muraria:

- Azioni Verticali $IQM_V = 2.50$
- Azioni Fuori Piano $IQM_{FP} = 2.00$
- Azioni Nel Piano $IQM_{NP} = 2.50$

Dato che la muratura non è caratterizzata da malta di pessima qualità, i valori degli indici per Analisi Statica e Analisi Sismica coincidono. L'eventuale riduzione per tenere conto di una malta di pessima qualità avrebbe interessato esclusivamente la valutazione ai fini dell'Analisi Sismica.

L'Indice di Qualità Muraria per azioni Fuori Piano è minore di 4.00; pertanto, la muratura potrebbe essere soggetta a disgregazione muraria in caso di sismi di elevata intensità. La verifica di disgregazione muraria (descritta nel seguito) individuerà per ogni pannello murario il valore dell'accelerazione al suolo (PGA) che comporta l'attivazione del fenomeno.

Dagli Indici di Qualità Muraria, attraverso apposite leggi di correlazione descritte in [4], scaturiscono gli intervalli di riferimento per i parametri meccanici. Dato che per la muratura in esame si ritiene appropriato il livello di conoscenza LC1, vengono selezionati valori medi dei moduli elastici (E, G) e valori minimi delle resistenze (f_m , τ_0).

Per la muratura in mattoni pieni e malta di calce non viene condotta la valutazione IQM e si fa direttamente riferimento ai valori dei parametri meccanici espressi dalla Tabella C8.5.I (NTC 2018). Anche in questo caso, dato il livello di conoscenza LC1, vengono selezionati valori medi dei moduli elastici (E , G) e valori minimi delle resistenze (f_m , τ_0 , f_{v0}).

In definitiva i valori dei parametri meccanici considerati per le due tipologie murarie in esame sono espressi nella seguente tabella.

		Conci sbozzati	Mattoni pieni	
Modulo di elasticità normale	E	1087	1500	N/mm ²
Modulo di elasticità tangenziale	G	366	500	N/mm ²
Resistenza media a compressione	f_m	1.707	2.400	N/mm ²
Resistenza media iniziale a taglio (irregolare)	τ_0	0.034	0.060	N/mm ²
Resistenza media iniziale a taglio (regolare)	f_{v0}		0.060	N/mm ²

Tabella 2. Parametri meccanici assegnati alle murature riscontrate nell'edificio in esame

La Verifica di Disgregazione viene condotta in modo interattivo in fase di modellazione strutturale. Nei Parametri di Calcolo, l'accelerazione strutturale che porta all'attivazione della disgregazione è fissata pari a $a_{DSG} = 0.300$ g.

L'immagine seguente mostra lo stato della verifica di disgregazione per tutti i maschi murari dell'edificio.

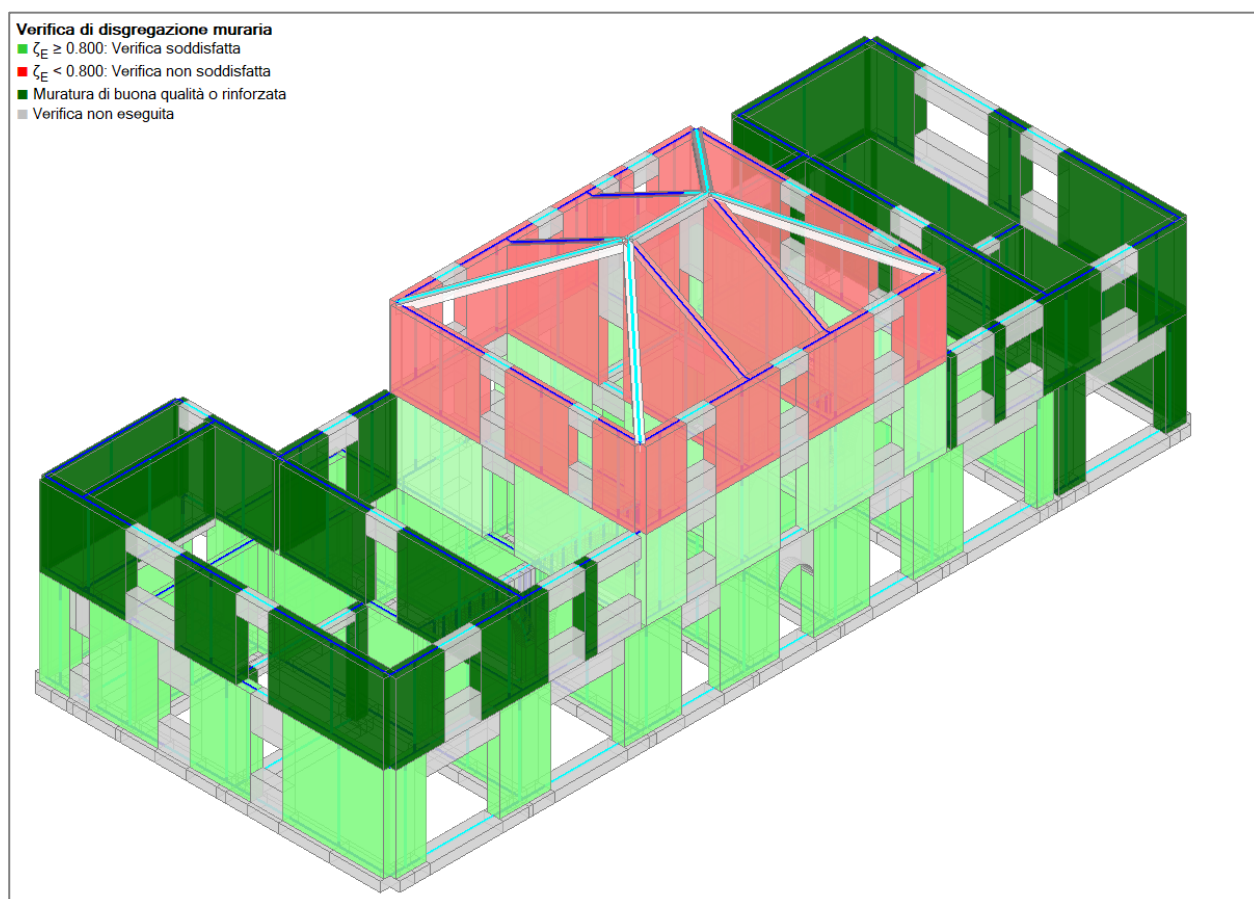


Fig. 13. Verifica di Disgregazione Muraria

La verifica risulta soddisfatta per tutti i maschi in muratura di mattoni pieni (in verde scuro) in quanto la muratura è considerata di buona qualità. Per questa muratura, infatti, non è stata condotta la valutazione IQM, ma grazie al grafico in fig. 2, è possibile affermare che l'Indice di Qualità Muraria per Azioni Fuori Piano (IQM_{FP}) è maggiore di 4. Pertanto, la verifica di disgregazione è automaticamente soddisfatta.

Per i maschi murari in muratura di conci sbazzati, invece, caratterizzati da $IQM_{FP} = 2.00 < 4$, la verifica di disgregazione viene svolta confrontando l'accelerazione spettrale agente alla base del maschio con l'accelerazione di attivazione della disgregazione ($a_{DSG} = 0.300 g$).

I maschi del Piano Terra sono investiti da un'accelerazione spettrale proprio pari all'accelerazione al suolo, $a_z = 0.282 g$, che risulta minore di a_{DSG} . In questo caso la verifica è soddisfatta e la capacità in termini di PGA coincide proprio con l'accelerazione di attivazione della disgregazione, $PGA_C = a_{DSG}$. Quindi, l'indicatore di rischio sismico dato dal rapporto tra capacità e domanda in termini di PGA, vale $\zeta_E = 0.300 / 0.282 = 1.06$.

I maschi dei piani superiori, invece, sono investiti da un'accelerazione spettrale amplificata rispetto all'accelerazione al suolo e calcolata secondo la formulazione dello spettro di piano espressa in §4. In particolare, per i maschi dell'ultimo piano, caratterizzati da una quota di base $z = 7.100 m$, l'accelerazione spettrale è data da:

$$a_z(7.1) = S_e(T_1, \xi) \cdot \gamma_1 \cdot \psi_1(z) \cdot \sqrt{1 + 0.0004\xi^2}$$

dove:

T_1 è il periodo fondamentale di vibrazione della costruzione, che viene qui stimato attraverso la relazione $T_1 = C_1 H^{3/4} = 0.05 \cdot (10.2)^{3/4} = 0.285 s$ (dove $H = 10.2 m$ è l'altezza complessiva della costruzione);

$S_e(T_1, \xi)$ è lo spettro di risposta elastico valutato per il periodo T_1 e smorzamento viscoso $\xi = 5\%$:
 $S_e(T_1, \xi) = 0.680 g$;

γ_1 è il coefficiente di partecipazione modale del modo fondamentale di vibrazione assunto pari a
 $\gamma_1 = \frac{3N}{2N+1} = 1.286$ (dove $N = 3$ è il numero di piani della costruzione);

$\psi_1(z)$ è il valore della forma modale fondamentale alla quota z , posto pari a $\frac{z}{H} = \frac{7.1}{10.2} = 0.696$.

Quindi i maschi murari dell'ultimo piano sono investiti da un'accelerazione spettrale pari a:

$$a_z(7.1) = 0.680g \cdot 1.286 \cdot 0.696 \cdot \sqrt{1 + 0.0004 \cdot 5^2} = 0.612g$$

L'accelerazione a_z è maggiore di a_{DSG} , quindi i maschi murari dell'ultimo piano sono vulnerabili nei confronti del fenomeno della disgregazione muraria.

Per determinare la capacità in termini di PGA relativa al meccanismo di disgregazione è necessaria una procedura iterativa basata sul tempo di ritorno T_R dell'azione sismica. Lo scopo della procedura iterativa è individuare l'azione sismica (T_R e PGA) per cui l'accelerazione spettrale alla base dei maschi murari (a_z) coincide proprio con l'accelerazione di attivazione della disgregazione (a_{DSG}). In questo caso la capacità in termini di PGA è stata calcolata pari a $PGA_C = 0.136 g$.

Pertanto, l'indicatore di rischio sismico dato dal rapporto tra capacità e domanda in termini di PGA, vale $\zeta_E = 0.136 / 0.282 = 0.482$.

Dato che $\zeta_E = 0.482$ è minore del valore obiettivo (in questo caso fissato pari a 0.8) la verifica di disgregazione risulta non soddisfatta.

Questo indicatore calcolato per i maschi murari dell'ultimo piano è anche il minore riscontrato in tutta la struttura; pertanto, l'indicatore di rischio sismico complessivo relativo al meccanismo di disgregazione muraria vale proprio $\zeta_E = 0.482$.

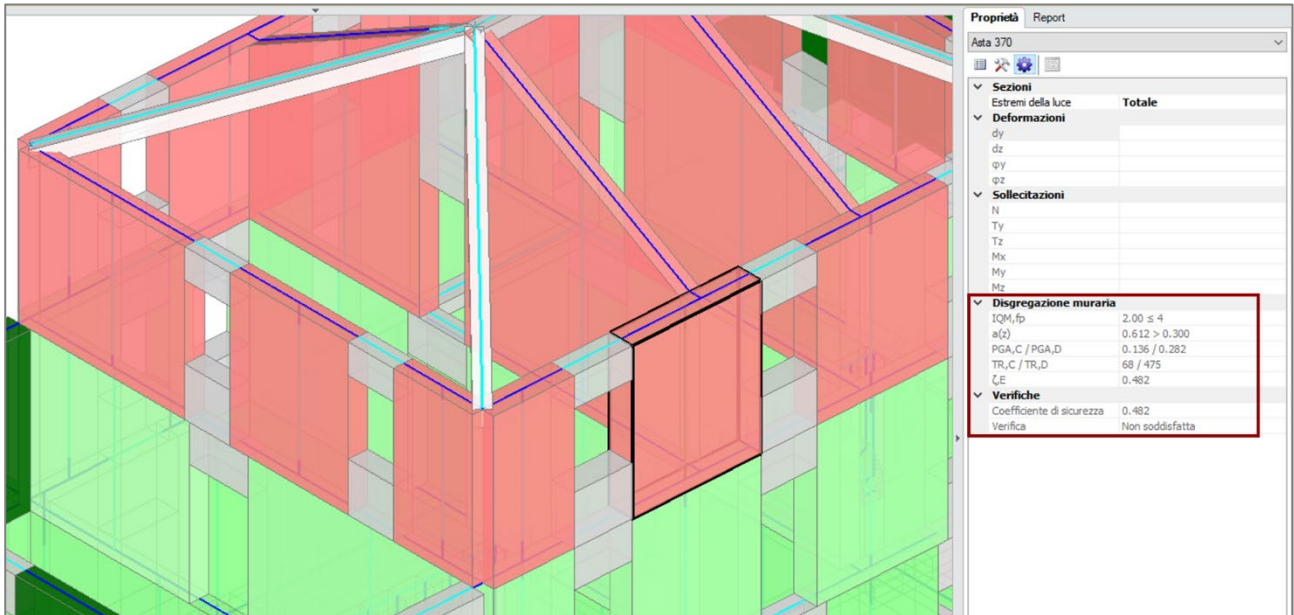


Fig. 14. Verifica di Disgregazione per un maschio murario dell'ultimo piano

La valutazione della sicurezza sismica dell'edificio allo SLV prosegue con l'analisi cinematica dei meccanismi di collasso locale e l'analisi pushover per la valutazione del comportamento sismico globale della struttura.

Alla fine di tutte le analisi, la scheda di sintesi propone una tabella riassuntiva in cui i vari comportamenti strutturali esaminati sono elencati in ordine di vulnerabilità, a partire da quello con indicatore di rischio sismico minore. Viene così a delinearsi una "gerarchia dei comportamenti strutturali".

Gerarchia dei comportamenti strutturali	
Indicatore di rischio sismico obiettivo: $\zeta_E \geq 0.800$	
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: Disgregazione muraria	0.482
SLV: Cinematismo	0.500
SLV: Resistenza fuori piano	0.695
SLV: Resistenza nel piano	0.695
SLO: Rigidezza (spostamenti)	
SLD: Rigidezza (spostamenti)	
SLD: Resistenza nel piano	
SLD: Resistenza fuori piano	
SLD: Capacità limite in fondazione	
SLV: Capacità limite in fondazione	
SLD: Cinematismo	

Fig. 15. Gerarchia dei comportamenti strutturali

Per l'edificio oggetto di valutazione, la disgregazione muraria ($\zeta_E = 0.482$) risulta il meccanismo più vulnerabile, seguito dai meccanismi di collasso locale (cinematismi) con $\zeta_E = 0.500$ e dalla resistenza dei pannelli nel piano e fuori piano (valutata attraverso l'analisi pushover) con $\zeta_E = 0.695$.

Questo risultato implica che per migliorare la sicurezza dell'edificio occorre innanzitutto consolidare la muratura in conci sbazzati dell'ultimo piano per prevenire fenomeni di disgregazione muraria. Dopodiché è possibile migliorare ulteriormente le prestazioni progettando interventi atti a contrastare l'attivazione di meccanismi di collasso locale (cinematismi).

Solo dopo aver progettato questo tipo di interventi, ha senso intervenire sulla resistenza nel piano e fuori piano dei pannelli murari per migliorare le prestazioni nei confronti del comportamento sismico globale.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato evidenziato quanto sia **fondamentale considerare il fenomeno della disgregazione muraria nella valutazione della sicurezza sismica** di un edificio esistente. La qualità della muratura gioca un ruolo determinante nella capacità di resistenza di una costruzione alle sollecitazioni sismiche, come dimostrato dai recenti eventi sismici che hanno colpito l'Italia Centrale.

Come sottolineato dalla **Normativa Tecnica vigente**, "**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**".

Si delinea quindi una **gerarchia dei meccanismi** per le costruzioni in muratura, **in cui la disgregazione muraria rappresenta il primo livello di vulnerabilità**, seguita dai meccanismi di collasso locale e infine dal comportamento sismico globale. Come evidenziato in [4], 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.

L'adozione dell'**Indice di Qualità Muraria (IQM)** si rivela uno strumento efficace per quantificare la vulnerabilità delle murature nei confronti della disgregazione, permettendo di individuare le situazioni più critiche in cui il rischio di crollo è elevato. **La metodologia descritta nel presente documento**, implementata nel software Aedes.PCM, **consente di effettuare una verifica oggettiva e riproducibile, fornendo un indicatore di rischio sismico ζ_E che aiuta nella definizione di strategie di intervento mirate.**

I risultati ottenuti confermano che la sicurezza sismica degli edifici esistenti in muratura non può prescindere da un'accurata valutazione della qualità muraria e dall'adozione di interventi di consolidamento adeguati. Il rafforzamento delle murature attraverso tecniche compatibili e rispettose delle caratteristiche costruttive originali rappresenta una strategia fondamentale per ridurre il rischio di disgregazione e migliorare la risposta sismica delle strutture.

In conclusione, la verifica della disgregazione muraria deve essere considerata un passaggio essenziale nella valutazione del rischio sismico degli edifici in muratura, così come nella progettazione degli interventi di miglioramento e adeguamento sismico.

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 [1]. Attualmente, gli studi di Massimo Mariani proseguono, insieme a Francesco Pugi, attraverso indagini sulla relazione fra contenuti sismici ad alta frequenza e fenomeni disgregativi.

Il Metodo IQM, negli sviluppi più recenti, ha studiato la connessione fra qualità muraria e propensione alla disgregazione. Nel presente documento, per l'impostazione teorico-applicativa del meccanismo di disgregazione muraria è stato fatto ampio riferimento ai lavori sul Metodo IQM di Antonio Borri e Alessandro De Maria [2,3,4,5]. Attraverso il Metodo IQM è stato possibile valorizzare il ruolo del meccanismo di disgregazione muraria consentendone l'inquadramento analitico nell'ambito delle valutazioni progettuali e ponendo in risalto il suo contributo nella gerarchia dei comportamenti strutturali per la definizione dell'indicatore di rischio sismico ζ_E .

BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

- [1] M. Mariani: 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/>
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] A. Borri, A. De Maria: Indice di Qualità Muraria (IQM) e correlazione con le caratteristiche meccaniche. ReLUIIS 2015 – Report WP1_1-1_2015UNIPG. In precedenza disponibile sul sito ReLUIIS 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>
- [6] Aedes.PCM, Aedes Software, versione 2025, www.aedes.it
- [7] App IQMindex, www.iqmindex.com