

LIVE, 22 settembre 2025

Francesco Pugi*

DISGREGAZIONE MURARIA E ANALISI GLOBALI

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

La disgregazione è una crisi di tipo fragile che caratterizza murature di bassa qualità sottoposte a rilevanti accelerazioni strutturali.

Esiste una **stretta relazione fra qualità della muratura, disgregazione e contenuto sismico ad alta frequenza **Jerk****

La **tendenza alla disgregazione** risulta una proprietà non solo intrinseca alla tessitura muraria, ma anche indotta ed **esaltata dalla dinamica delle oscillazioni verticali**

PERCORSO DI **DEFINIZIONE DELLA DISGREGAZIONE MURARIA**
E DELLA CORRISPONDENTE **VERIFICA** NELLE ANALISI GLOBALI

4 PASSI FONDAMENTALI PROGRESSIVI

- 1.** RICONOSCERE LA DISGREGAZIONE COME
PASSO INIZIALE DELLA **GERARCHIA DEI MECCANISMI**
- 2.** DEFINIRE LA DISGREGAZIONE
IN FUNZIONE DELLA **QUALITA' MURARIA**
- 3.** COMPRENDERE L'**EFFETTO DEL JERK**
SU QUALITA' MURARIA E DISGREGAZIONE
- 4.** IMPLEMENTARE LA **VERIFICA DI DISGREGAZIONE**
NELLE ANALISI GLOBALI DI VULNERABILITA'

1. RICONOSCERE LA DISGREGAZIONE COME PASSO INIZIALE DELLA GERARCHIA DEI MECCANISMI

INDICAZIONI NORMATIVE: GERARCHIA DEI MECCANISMI

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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



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

2. DEFINIRE LA DISGREGAZIONE IN FUNZIONE DELLA QUALITA' MURARIA

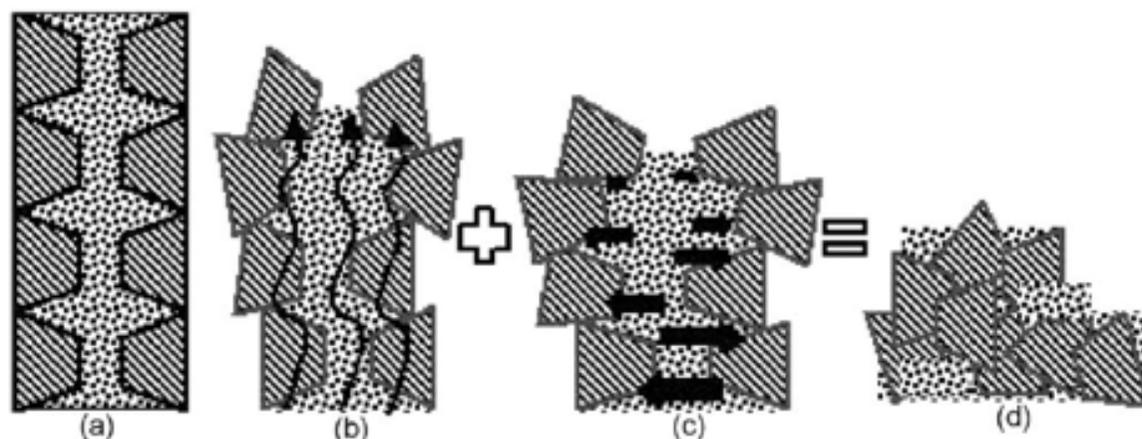
Quali sono i parametri che caratterizzano una muratura soggetta a fenomeni disagregativi?



CONDIZIONE NECESSARIA E SUFFICIENTE
PER LA DISGREGAZIONE:

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

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



Meccanismo di collasso innescato dalle alte frequenze

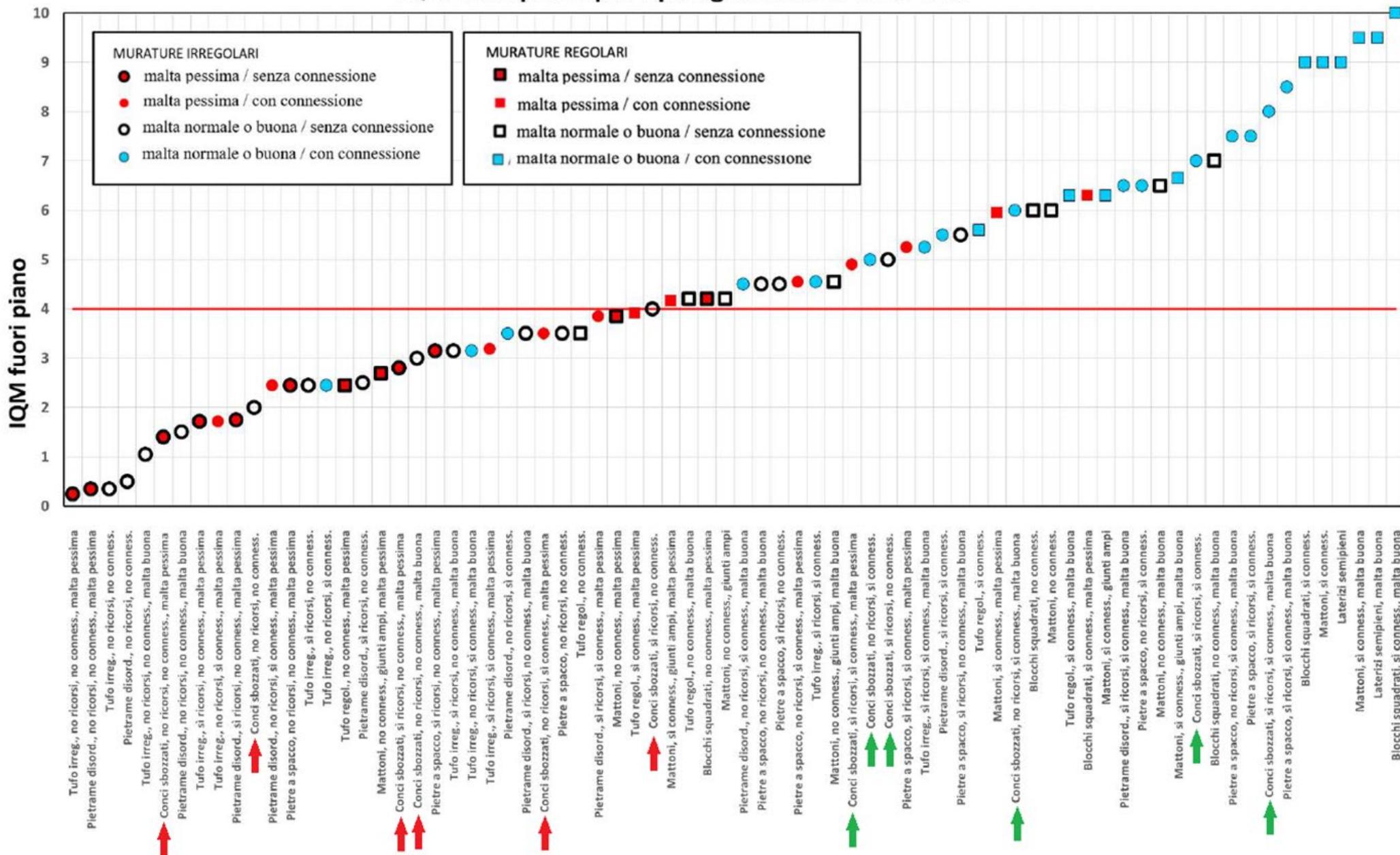
Nel 2007 Meyer et. al. hanno studiato i **danni sismici sugli edifici esistenti in muratura correlati ai meccanismi di disgregazione**, con particolare riferimento a **murature povere costruite con malte di pessima qualità**.

L'evoluzione del processo disgregativo viene rappresentata nell'immagine (tratta dal lavoro citato): una parete in muratura costituita da due paramenti e contenenti un nucleo interno di materiale sciolto (a), a causa delle vibrazioni gli elementi lapidei vengono spostati (b); il nucleo tende a densificarsi e fluidificarsi e la pressione laterale interna aumenta (c); infine, la parete crolla (d).

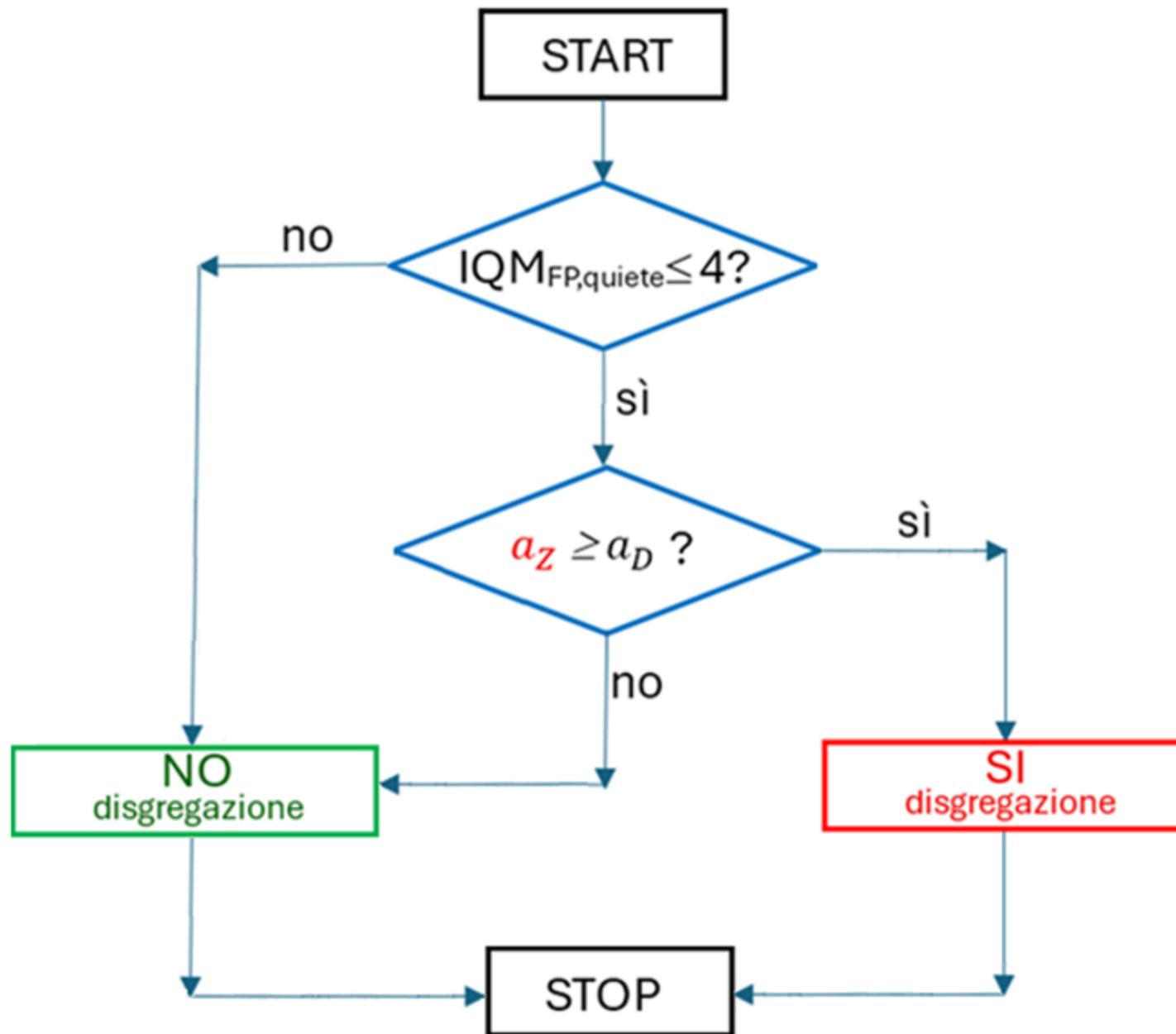
I test illustrati, in quanto condotti su murature vulnerabili nei confronti della disgregazione, possono costituire un riferimento per definire soglie di accelerazione di attivazione della disgregazione in dipendenza dal valore di IQM_{FP} .

Si identifica così in **0.15 g il valore di α_D corrispondente al minimo IQM_{FP} (pari a 0) e in 0.45 g il valore di α_D corrispondente a $IQM_{FP} = 4$.**

IQM fuori piano per tipologie murarie NTC 2018



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

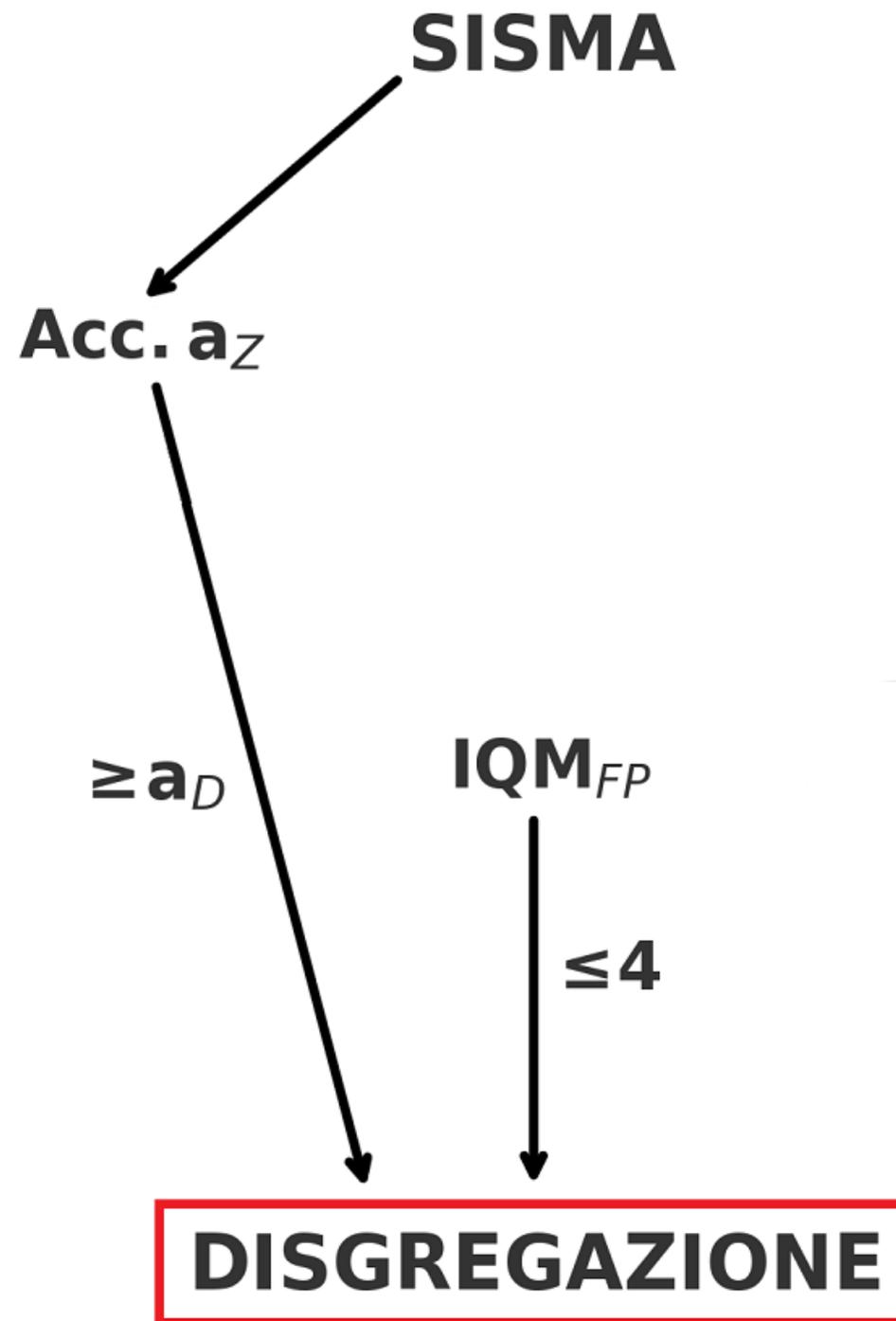


Processo di valutazione della tendenza alla disgregazione per una parete in muratura sottoposta a sollecitazione sismica

IQM_{FP} ▼	QUIETE SISMICA	SISMA $a_z \geq a_D$
	(A)	
	(B)	
	(C)	

DISGREGAZIONE MURARIA
(senza considerare gli effetti del JERK)

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

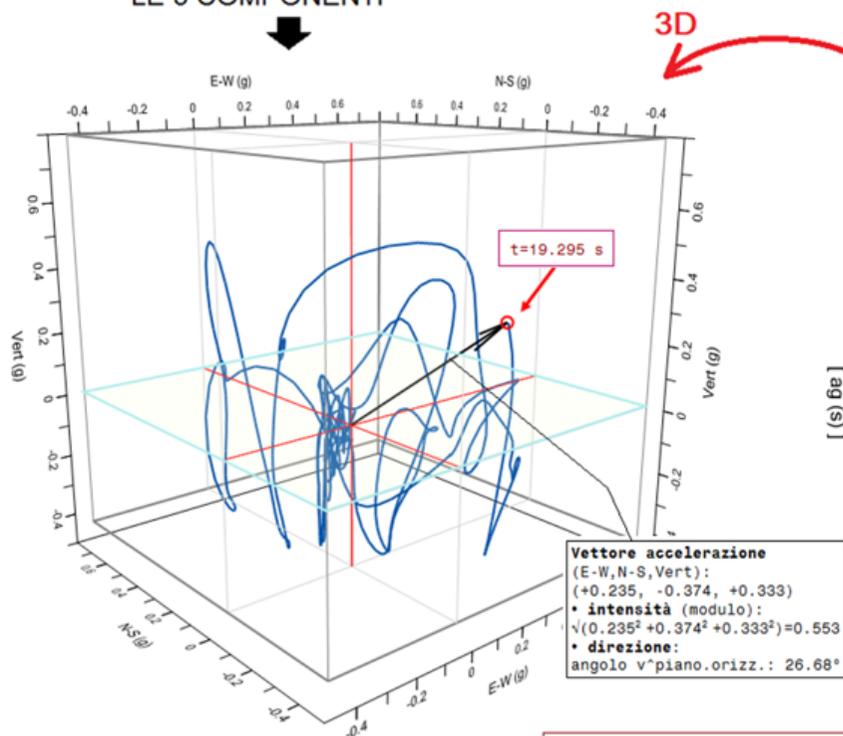


3. COMPRENDERE L'EFFETTO DEL JERK SU QUALITA' MURARIA E DISGREGAZIONE

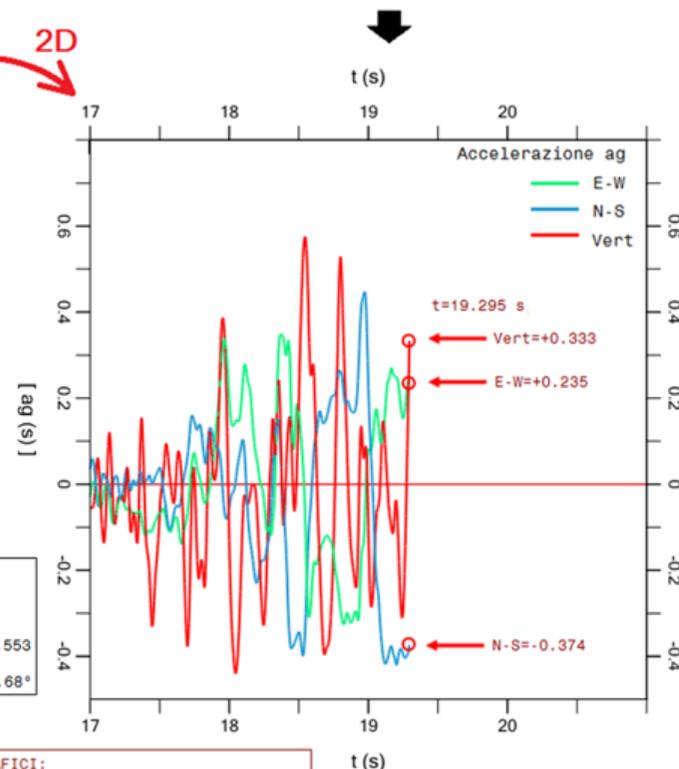
➔ Anzitutto: conoscere il Jerk ➔

ACCELEROGRAMMA: EVOLUZIONE DALLA RAPPRESENTAZIONE PIANA ALLA TRIDIMENSIONALE

VISTA 3D DEGLI ACCELEROGRAMMI:
LA TRAIETTORIA DEL VETTORE
ACCELERAZIONE DESCRIVE
CONTEMPORANEAMENTE
LE 3 COMPONENTI

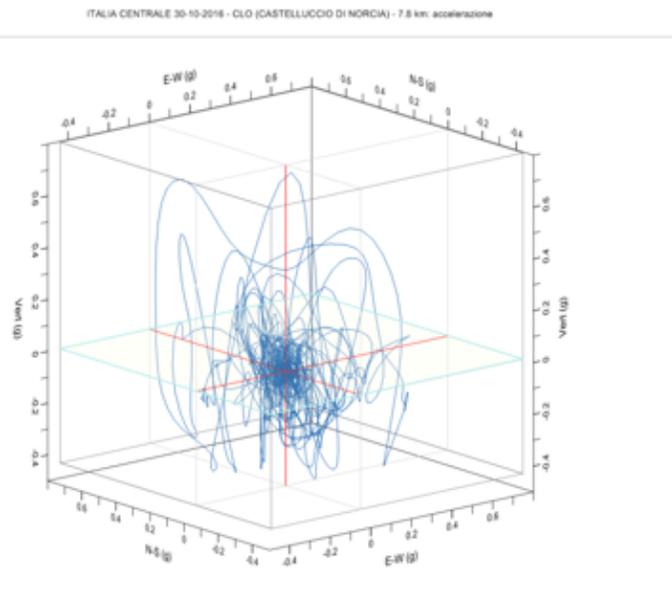


VISTA 2D DEGLI ACCELEROGRAMMI
(SOVRAPPOSTI):
OGNUNA DELLE 3 COMPONENTI
E' DESCRITTA IN FUNZIONE DI t

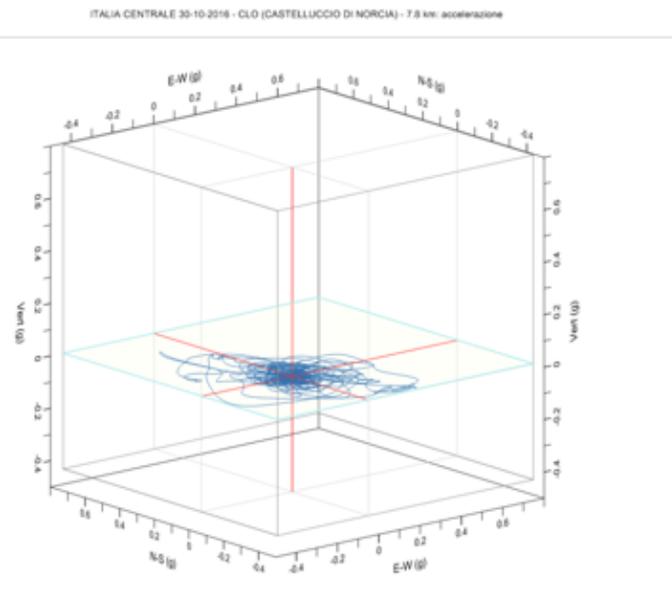


○ PUNTO EVIDENZIATO NEI GRAFICI:
ACCELERAZIONI IN CORRISPONDENZA DELL'ISTANTE
t=19.295 s:
accelerazione ag (g): E-W=+0.235, N-S=-0.374, Vert=+0.333
|ag|=0.553 - A°H=26.68°

ACCELEROGRAMMA 3D: COMPONENTE VERTICALE



Accelerogramma 3D con componente verticale



Accelerogramma 3D SENZA componente verticale

JERK: VARIAZIONE DELLA FORZA ESERCITATA SULLA MASSA DURANTE IL MOTO

La derivata dell'accelerazione, detta anche *velocità dell'accelerazione* o *derivata terza dello spostamento*, è denominata in letteratura *jerk* ed è indicata con il simbolo j o con l'acronimo *TDoA* (Time Derivative of Acceleration):

$$\mathbf{j} = \frac{d\mathbf{a}}{dt}$$

Poiché la forza esercitata su una massa è proporzionale all'accelerazione, il jerk è legato alla variazione della forza esercitata sulla massa durante il moto:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \Rightarrow \mathbf{j} = \frac{\left(\frac{d\mathbf{F}}{dt}\right)}{m}$$

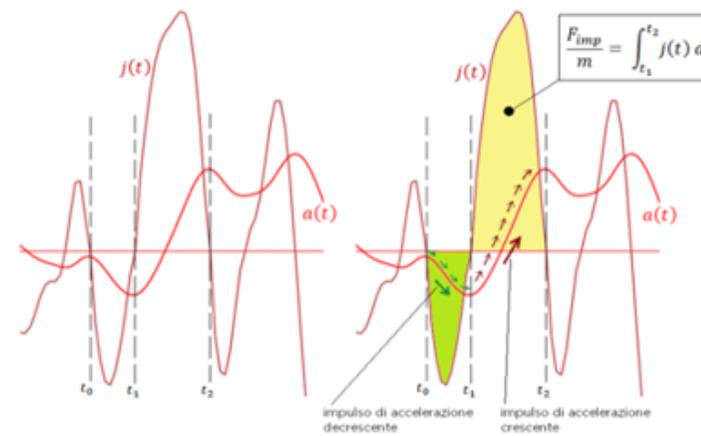
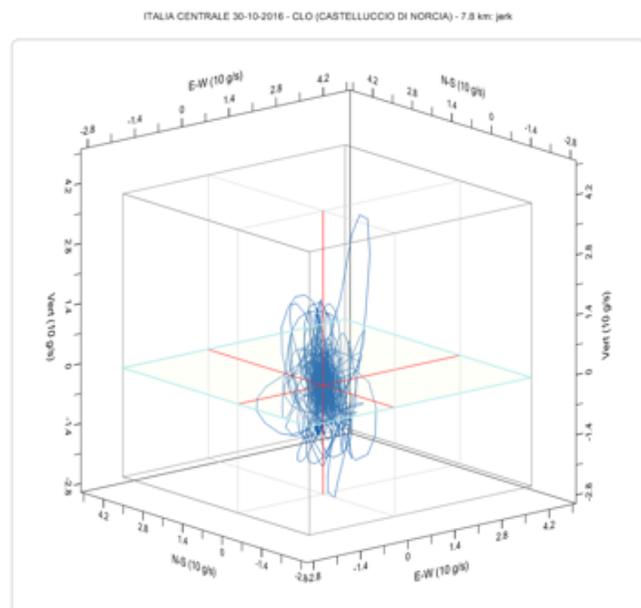
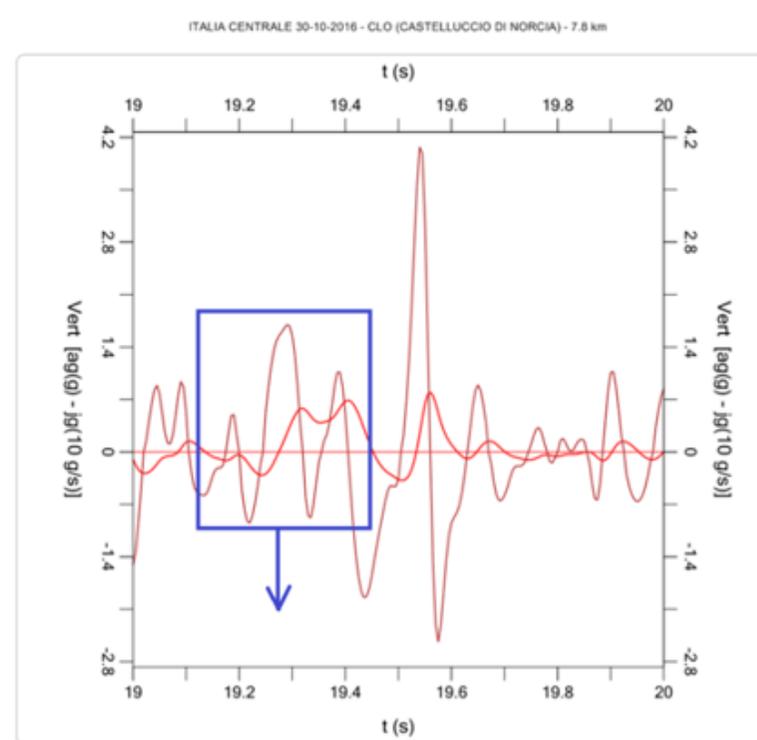
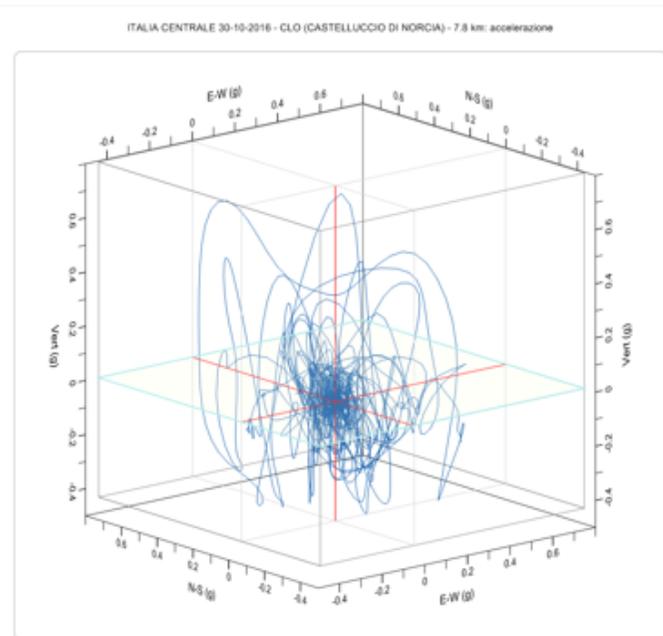
Una massa sottoposta ad accelerazione costante, pertanto in assenza di jerk, è soggetta ad un carico statico (forza costante) e in questa situazione non possono generarsi vibrazioni. Se ne deduce che quando in un corpo in moto si manifestano vibrazioni, il jerk è sempre presente.

Essendo l'accelerazione sismica una funzione discreta, ossia campionata per punti, il jerk viene determinato numericamente con le formule alle differenze finite centrate:

$$j(t_i) = \frac{a(t_{i+1}) - a(t_{i-1}))}{2\Delta t} \quad (i = 2, \dots, N - 1) \quad (3)$$

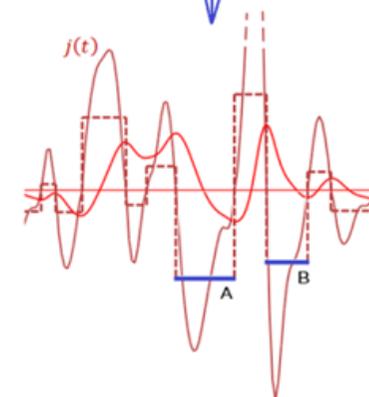
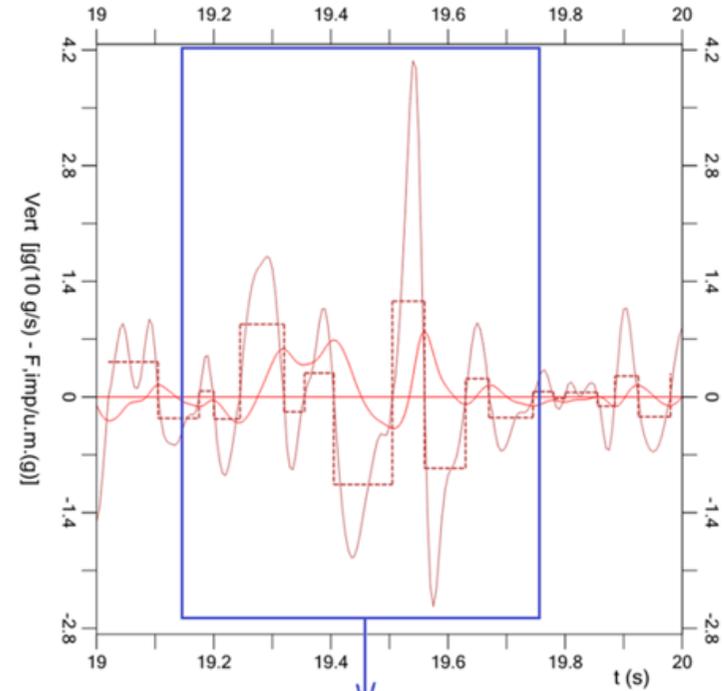
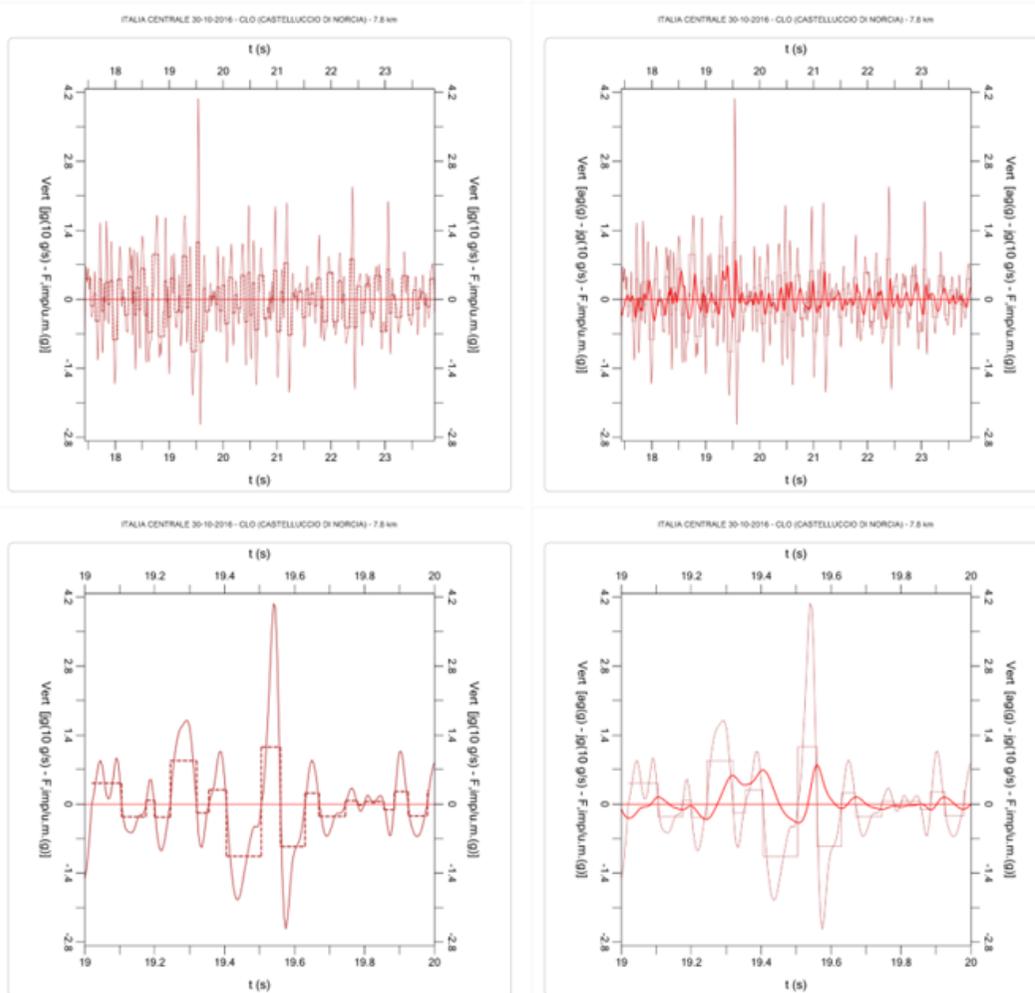
dove $a(t_i)$ è l'accelerazione all'istante t_i , N è il numero totale dei punti di campionamento, Δt è l'intervallo di campionamento. Questo calcolo viene eseguito separatamente per ognuna delle tre componenti del jerk, che insieme formano il vettore \mathbf{j} .

SISMOGRAMMI 3D: CONFRONTO FRA ACCELERAZIONE E JERK



Forza impulsiva per unità di massa, definita dall'integrale del jerk fra due zeri consecutivi, corrispondenti a massimi e minimi locali dell'accelerazione

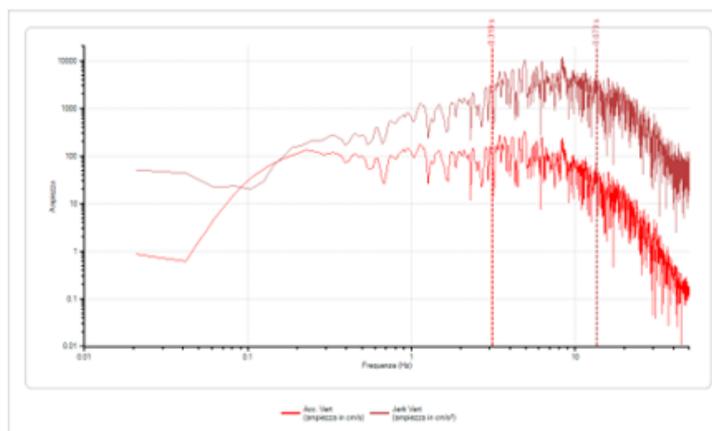
JERK: FORZE IMPULSIVE



Picchi di jerk
e corrispondenti
forze impulsive

*Jerk e forze impulsive per unità di massa,
per la componente verticale del terremoto di Castelluccio del 30.10.2016*

JERK: CONTENUTO IN ALTA FREQUENZA, IN PARTICOLARE PER LA COMPONENTE VERTICALE



*Castelluccio di Norcia, 30.10.2016:
spettro di Fourier di accelerazione e jerk per la componente Vert.*

$T_m(s)$	EW	NS	Vert.
Accelerazione	0.657	0.540	0.319
Jerk	0.107	0.137	0.073

Periodo medio per accelerazione e jerk per il terremoto di Castelluccio di Norcia

La tabella mostra un aspetto importante: il contenuto spiccatamente impulsivo della componente verticale. Le frequenze contenute nel segnale verticale sono più elevate in modo significativo rispetto alle componenti orizzontali. Esaminando i periodi medi delle componenti del moto sismico, risulta evidente come **i periodi del jerk siano dello stesso ordine di grandezza dei periodi propri delle costruzioni più rigide, quali gli edifici in muratura**: ciò evidenzia possibili criticità prodotte dall'azione impulsiva sugli elementi strutturali.

The 14th World Conference on Earthquake Engineering
October 12-17, 2008, Beijing, China



Jerk and Jerk Sensor

Yang Xueshan¹, Qi Xiaozhai¹, George C. Lee², Mai Tong² and Cao Jinming¹

¹ Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080 China

Email: yangxs_iem@126.com yangxs_iem@126.com

Email: qxziem@126.com qxziem@126.com

² Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, Buffalo, NY, 14261, USA

ABSTRACT :

This paper presents the principles and specifications of a new sensor for measuring the derivatives of acceleration. Derivative of acceleration is the first order differentiation of acceleration. It is also referred to as “Jerk”. Jerk is directly related to a physical damage process of materials and structures. The derivative of acceleration (jerk) has been found to have many useful applications. Examples are: high dynamic motion aerial vehicle trace measurement, earthquake-resistant mechanisms of structures, mechanisms of high speed auto-control of machines, human responses in high-speed moving vehicle and high-speed elevators.

Nel caso delle murature, è naturale estendere questo concetto al livello macroscopico di dissociazione del legame fra gli elementi lapidei per disgregazione della malta

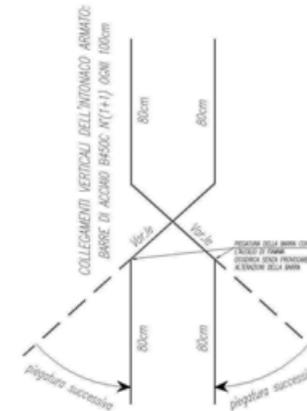
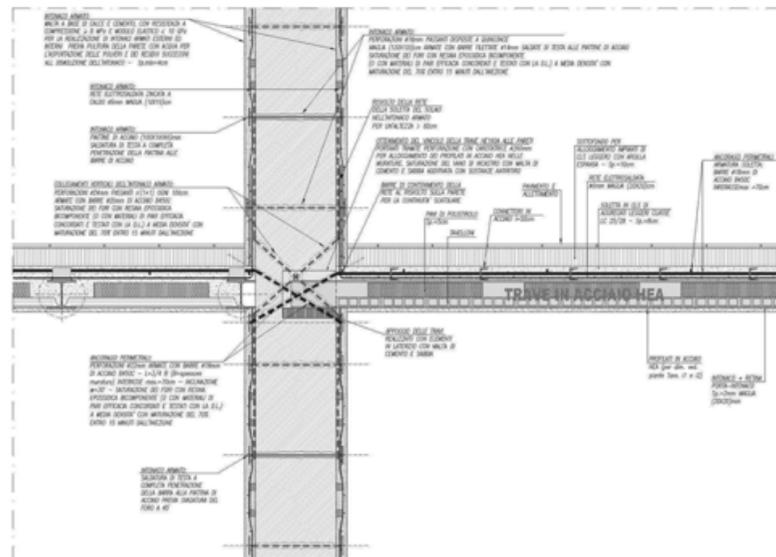
SISMA VERTICALE > JERK (RISONANZA) > DISGREGAZIONE = PERDITA DI ROBUSTEZZA



CONSOLIDAMENTO: DEVE INTERVENIRE SU COLLEGAMENTI, NODI, CONNESSIONI

Interventi di consolidamento: devono **implementare le capacità reagenti** di *'regioni particolari (zone di discontinuità, punti di applicazione del carico, zone di concentrazione degli sforzi, nodi, connessioni, ecc....)'*

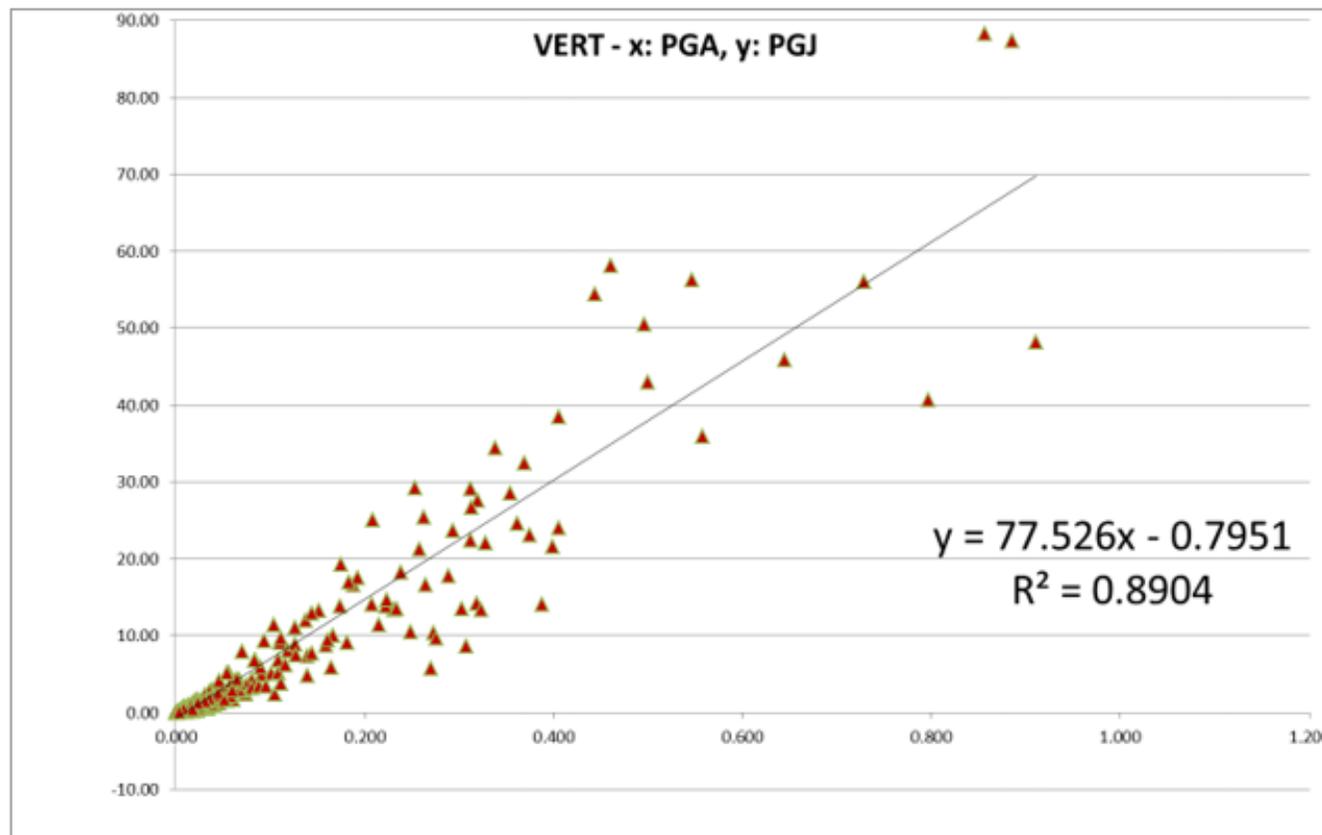
(CNR DT 214/2018: Istruzioni per la valutazione della robustezza delle costruzioni, §6.1.1)



Sono stati considerati 8 eventi sismici di rilevante entità verificatisi in territorio italiano: Italia Centrale, 30.10.2016; Accumuli, 24.08.2016; Emilia, 29.05.2012; L'Aquila, 06.04.2009; Umbria-Marche, 26.09.1997; Irpinia, 23.11.1980; Valnerina, 19.09.1979; Friuli, 06.05.1976, le cui registrazioni accelerometriche sono disponibili nei database di INGV.

E' stato quindi eseguito uno studio di tipo statistico riguardante tali eventi ed un totale di **447 registrazioni**, al fine di determinare sia la correlazione fra accelerazione e Jerk, sia le frequenze caratteristiche attraverso analisi con spettro di Fourier.

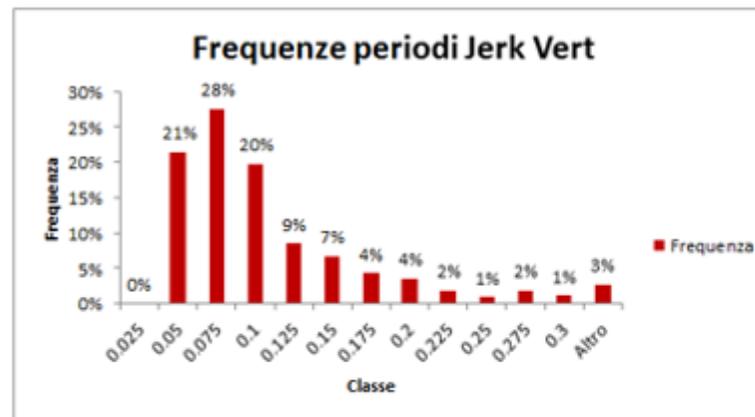
In figura viene riportata la **correlazione fra accelerazione e jerk per la componente verticale**.



Correlazione PGA-PGJ per la componente verticale

A partire dal valore di progetto di PGA è quindi possibile stimare il **picco di Jerk PGJ**

Classe	Frequenza	
0.025	0.00%	0
0.05	21.48%	96
0.075	27.52%	123
0.1	19.69%	88
0.125	8.50%	38
0.15	6.71%	30
0.175	4.25%	19
0.2	3.58%	16
0.225	1.79%	8
0.25	0.89%	4
0.275	1.79%	8
0.3	1.12%	5
Altro	2.68%	12



Analisi statistica dei periodi del Jerk verticale

Tong et al. hanno evidenziato **come valore di Jerk molto forte la soglia di 10 g/s.**

Tong et al. hanno studiato sia il Jerk orizzontale che il Jerk verticale, pertanto **i valori di soglia possono essere associati in generale al vettore spaziale Jerk, componente verticale inclusa.**

Per quantificare l'effetto del Jerk ad una certa quota dell'edificio occorre considerare il **Jerk lungo l'elevazione.**

Una prima considerazione riguarda il Jerk orizzontale.

Secondo Tong, è ipotizzabile che l'amplificazione del **Jerk orizzontale** con la quota sia simile a quella dell'accelerazione. Le strutture in muratura di qualità medio/bassa hanno moduli elastici bassi e quindi periodi orizzontali di 0.2-0.3 s (corrispondenti a frequenze fra 5 Hz e 3 Hz): pertanto, tendono a interessare la zona di spettro che non esalta il Jerk, ma che anzi può mostrarne un'attenuazione rispetto al valore di ancoraggio.

Murature più rigide nei confronti delle oscillazioni orizzontali (ad es. mattoni pieni e malta cementizia) ricadono invece più facilmente nella zona di spettro con amplificazione del Jerk orizzontale, ma si tratta di murature poco o per niente soggette a disgregazione oppure consolidate.

Consideriamo ora il fenomeno impulsivo in direzione verticale.

Diversamente dall'orizzontale, il **periodo proprio verticale principale delle strutture murarie**, anche di materiale di scarsa qualità, è sempre **molto basso a causa dell'elevata rigidità estensionale**.

E' possibile ritenere che la struttura non eserciti un filtro attenuante.

Il contenuto in frequenza del Jerk verticale è caratterizzato da valori elevati, compresi fra 10 Hz e 20 Hz aventi ordini di grandezza simili alla frequenza propria principale in direzione verticale di strutture rigide quali gli edifici esistenti in muratura. Di conseguenza:

nella propagazione del Jerk dal suolo lungo l'elevazione dell'edificio possono manifestarsi fenomeni di risonanza.

Mariani e Pugi hanno proposto di fare riferimento al **Jerk verticale di ancoraggio dello spettro (PGJ_v)**, e di considerare che **la forte rigidità verticale della muratura ne possa amplificare gli effetti per risonanza**

Per le applicazioni progettuali, dal picco di accelerazione al suolo $PGA_V = a_{g_V} \cdot S$ in direzione verticale (ottenuto, secondo la Norma italiana, dall'accelerazione $a_{g_V} = a_{g_H}$ moltiplicata per il coefficiente topografico S_T , essendo: $S = S_S \cdot S_T$, con $S_S = 1.0$) si può direttamente ricavare il **picco di Jerk verticale PGJ_V** attraverso la relazione di origine statistica già illustrata:

$$PGJ_V = 77.526 PGA_V - 0.795$$

Nelle pareti dell'edificio, il picco di Jerk verticale, per quanto sopra osservato, viene amplificato dagli effetti di risonanza. Si definisce "**Jerk verticale strutturale**", e si indica con il simbolo J_{VS} , il prodotto del picco al suolo PGJ_V per il coefficiente di amplificazione per risonanza C_{ampl} :

$$J_{VS} = PGJ_V \cdot C_{ampl}$$

J_{VS} fornisce per il sisma di progetto il Jerk che può essere confrontato con il valore di soglia di danno strutturale J_{VSd} . Il coefficiente di amplificazione per risonanza può essere calcolato attraverso la seguente formulazione dove T_1 è il periodo principale in direzione verticale della struttura e ξ_{eq} il coefficiente di smorzamento:

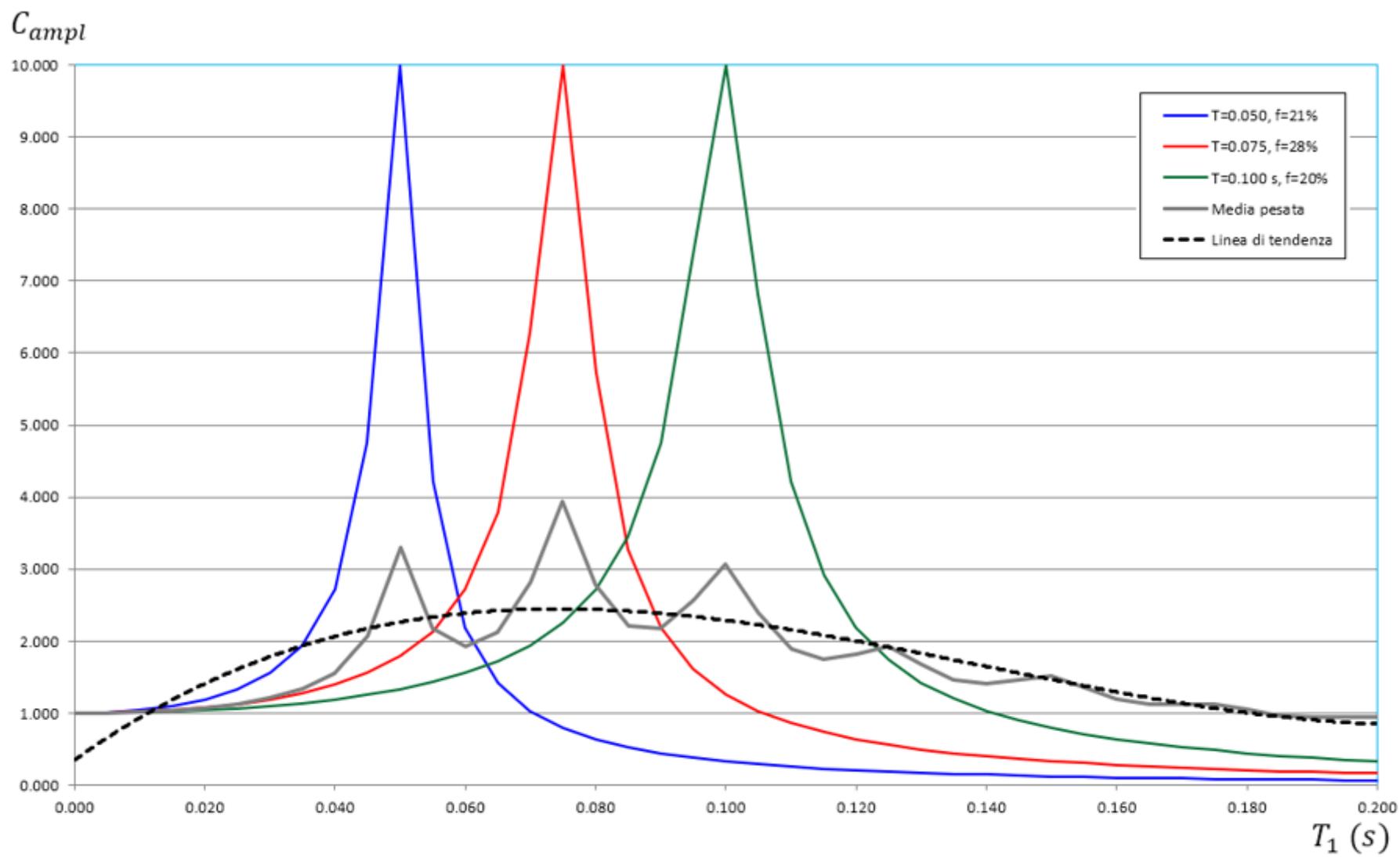
$$C_{ampl} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{T_1^2}{T^2}\right)^2 + 4 \xi_{eq}^2 \frac{T_1^2}{T^2}}}$$

dove:

T_1 = periodo principale della struttura in direzione verticale,

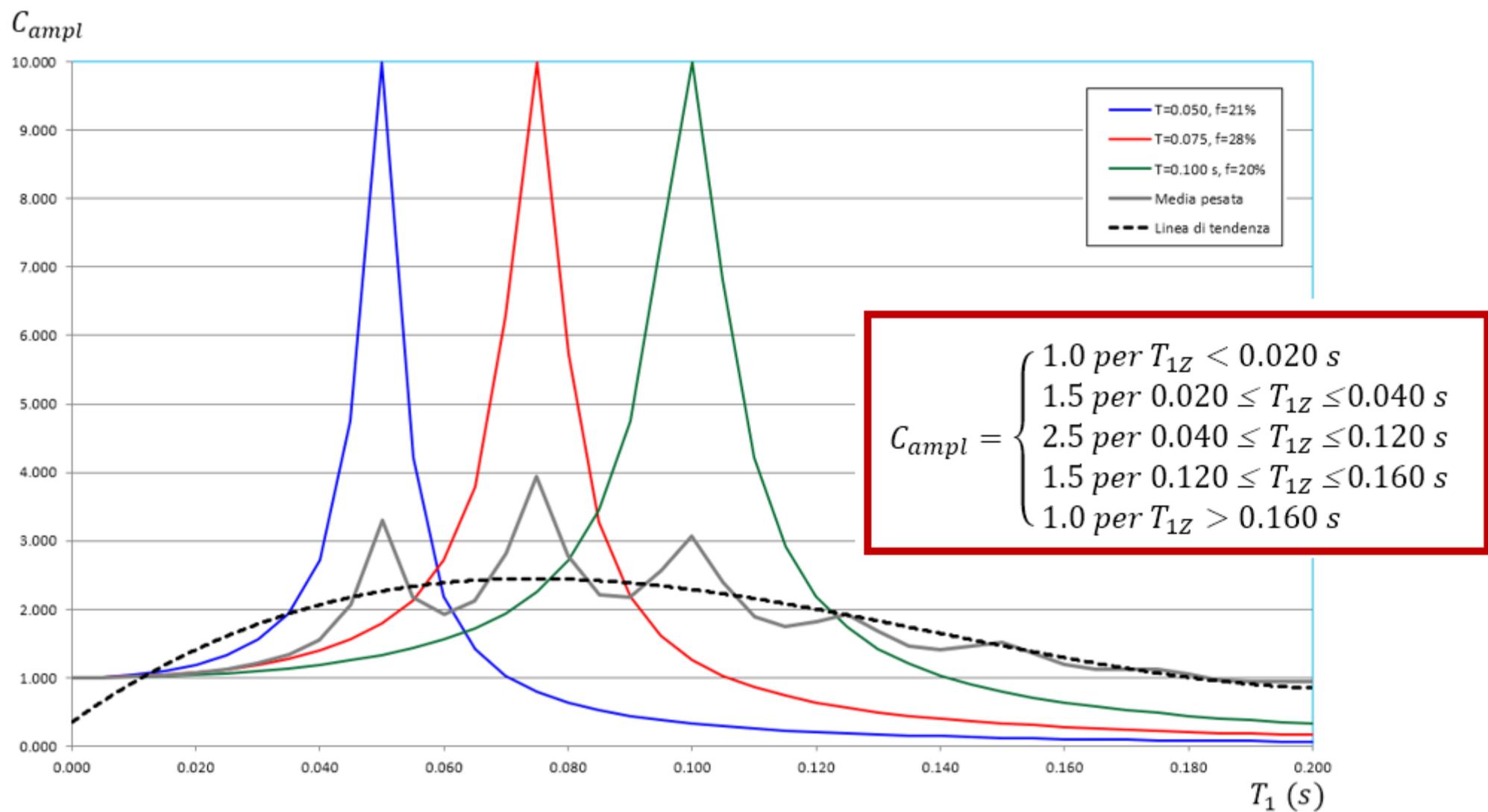
T = periodo della forzante, coincidente col periodo rappresentativo del Jerk verticale,

ξ_{eq} = coefficiente di smorzamento viscoso equivalente.

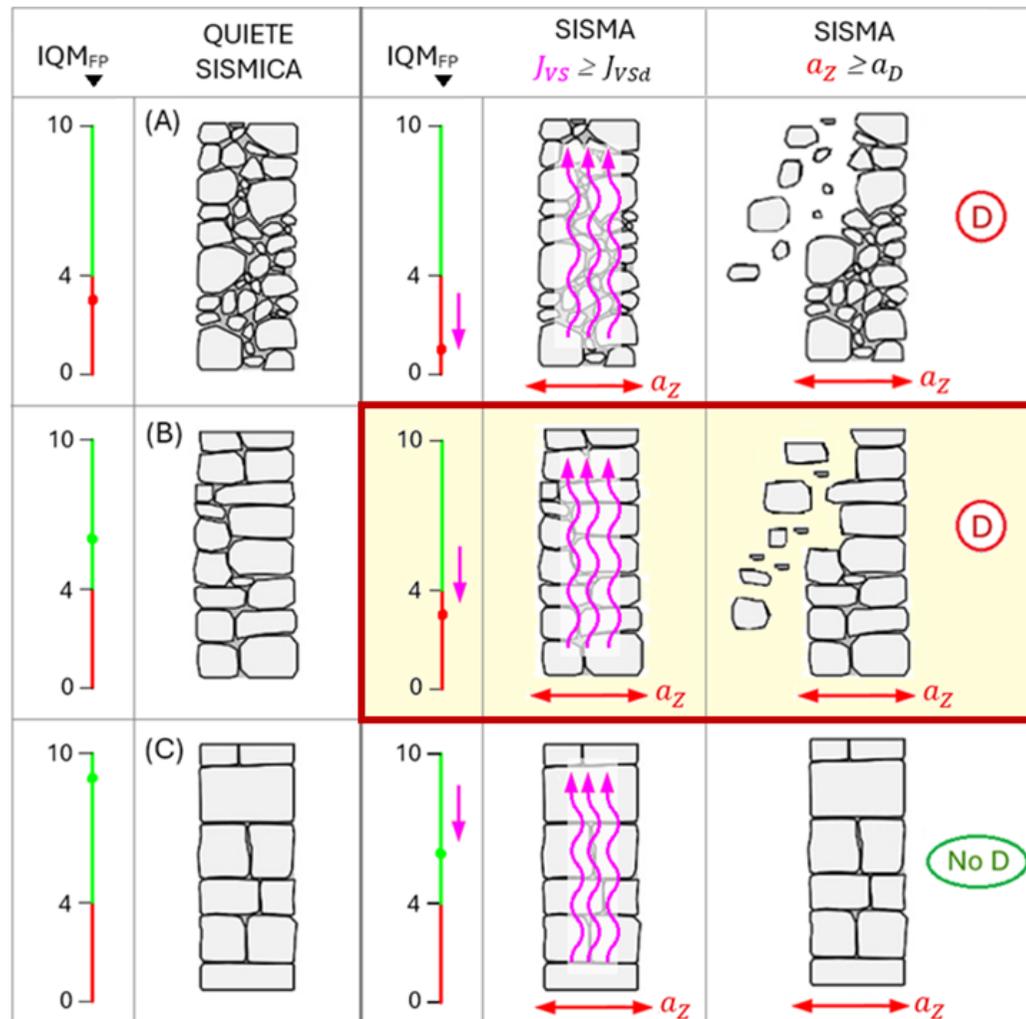


*Coefficiente di amplificazione del Jerk verticale C_{ampl}
in funzione del periodo proprio T_1 della costruzione in direzione verticale*

Per le finalità progettuali del presente lavoro, si assume che C_{ampl} sia massimo e pari a 2.5 nell'intervallo fra 0.040 s e 0.120 s, e in funzione dei vari periodi propri sia definito dall'espressione in figura



Connessione fra Disgregazione, Indice di Qualità Muraria e Jerk

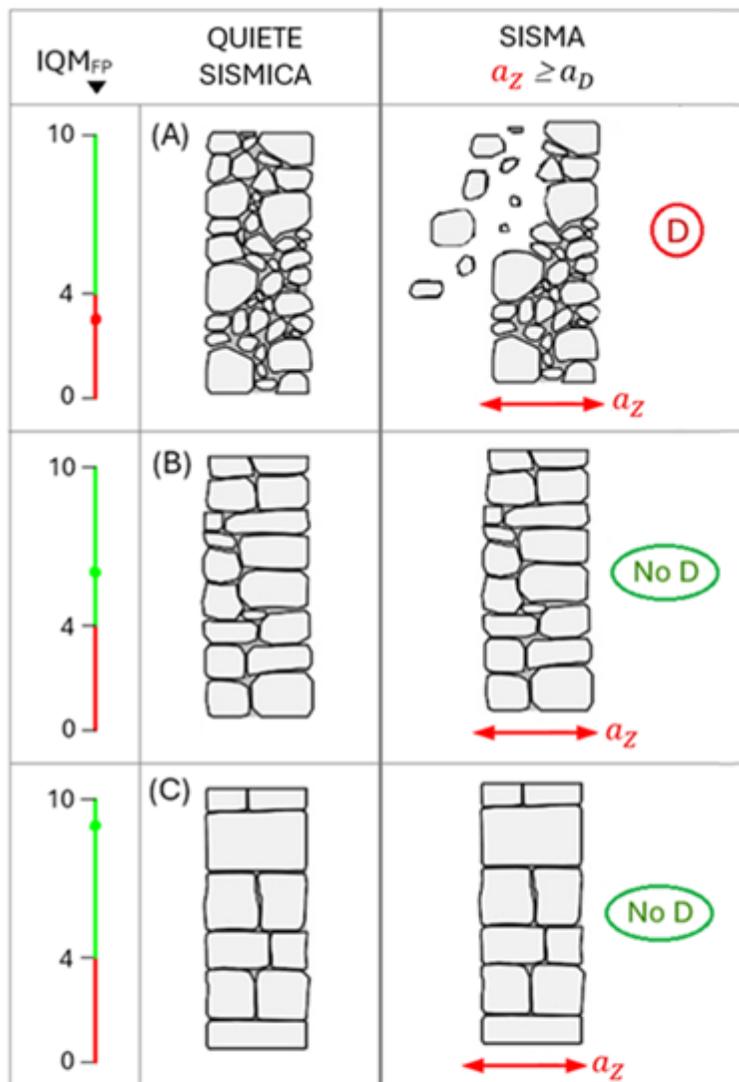


DISGREGAZIONE MURARIA in funzione del JERK

$\Delta IQM_{FP} = (IQM_{FP,quiete} - IQM_{FP,sismico})$ dove:

$IQM_{FP,sismico} = f(IQM_{FP,quiete}; J_{vs}; J_{vsd})$

$D = f(IQM_{FP,sismico}; a_D; P)$ dove: $a_D = a_D(IQM_{FP,sismico})$



DISGREGAZIONE MURARIA

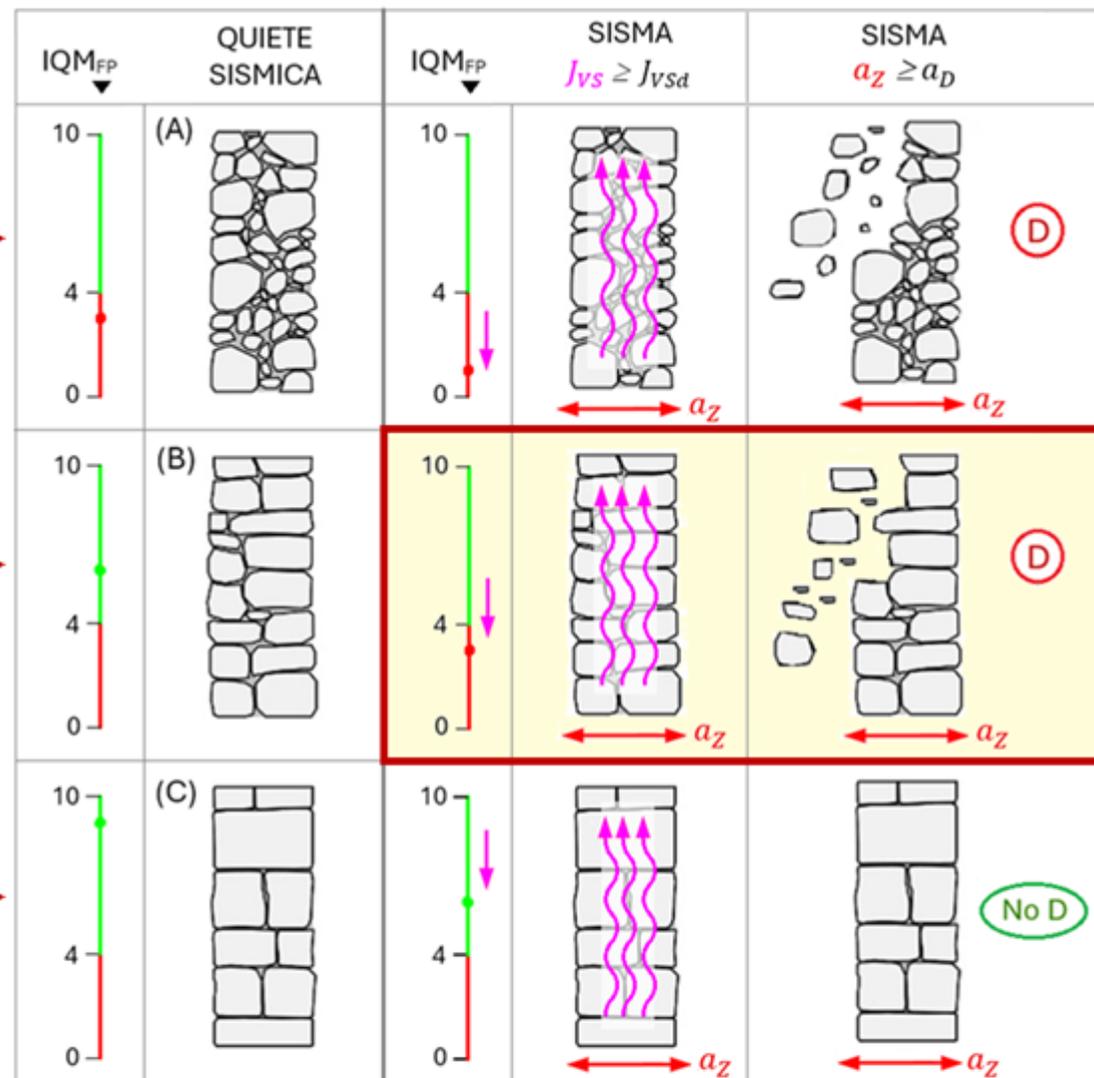
(senza considerare gli effetti del JERK)

$$D = f(IQM_{FP}; a_D; P) \quad \text{dove: } a_D = a_D(IQM_{FP})$$

JERK →

JERK →

JERK →

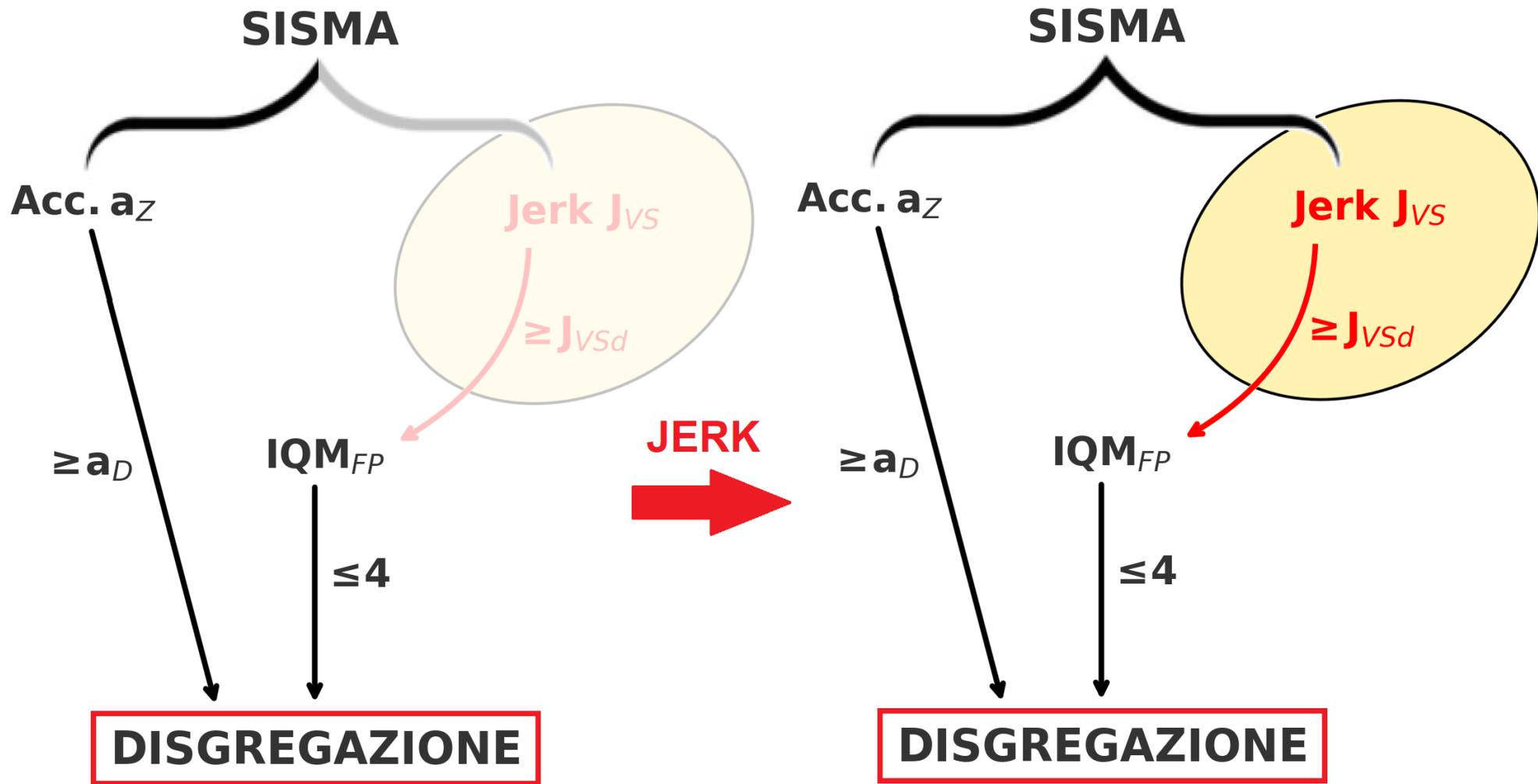


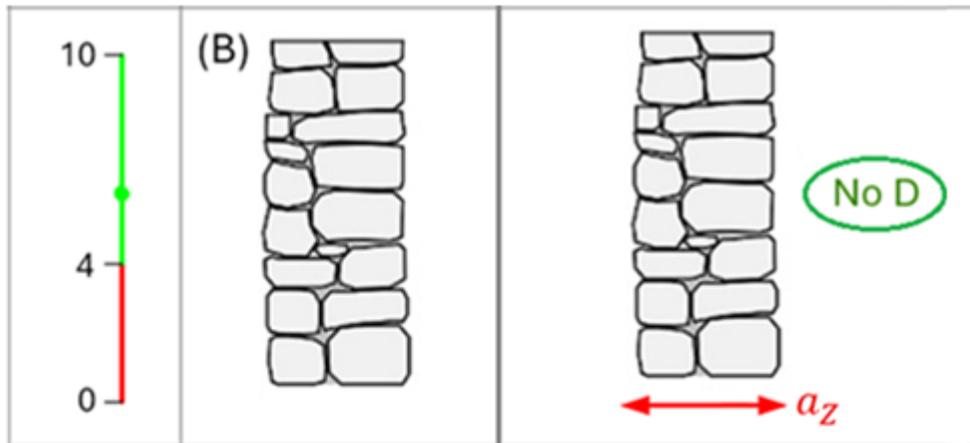
DISGREGAZIONE MURARIA in funzione del JERK

$\Delta IQM_{FP} = (IQM_{FP,quiete} - IQM_{FP,sismico})$ dove:

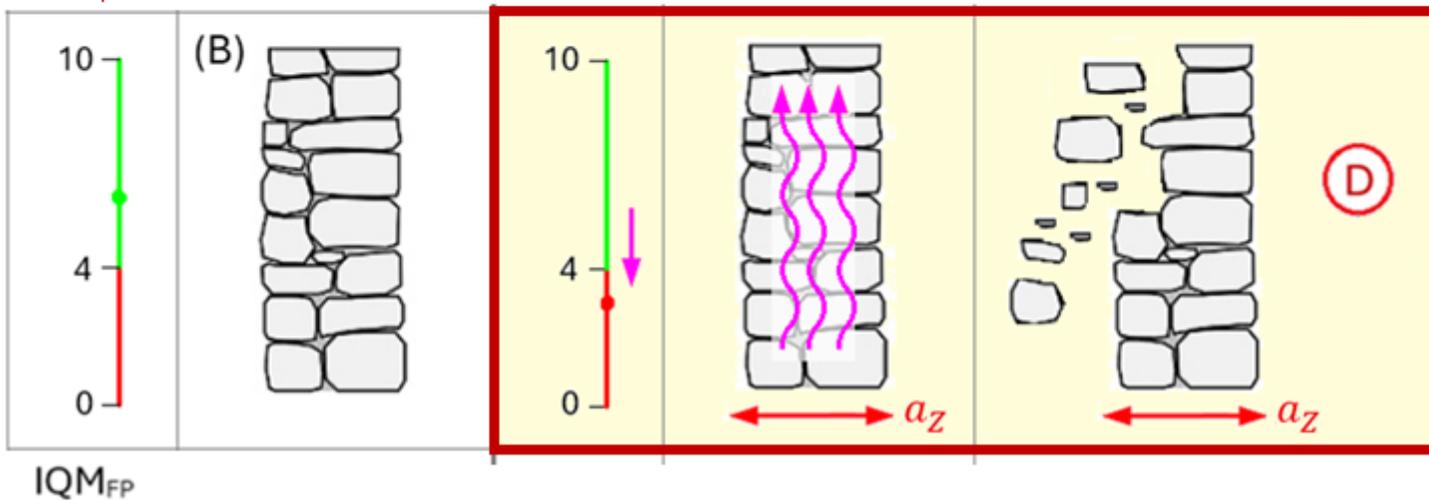
$IQM_{FP,sismico} = f(IQM_{FP,quiete}; Jvs; Jvsd)$

$$D = f(IQM_{FP,sismico}; a_D; P) \quad \text{dove: } a_D = a_D(IQM_{FP,sismico})$$



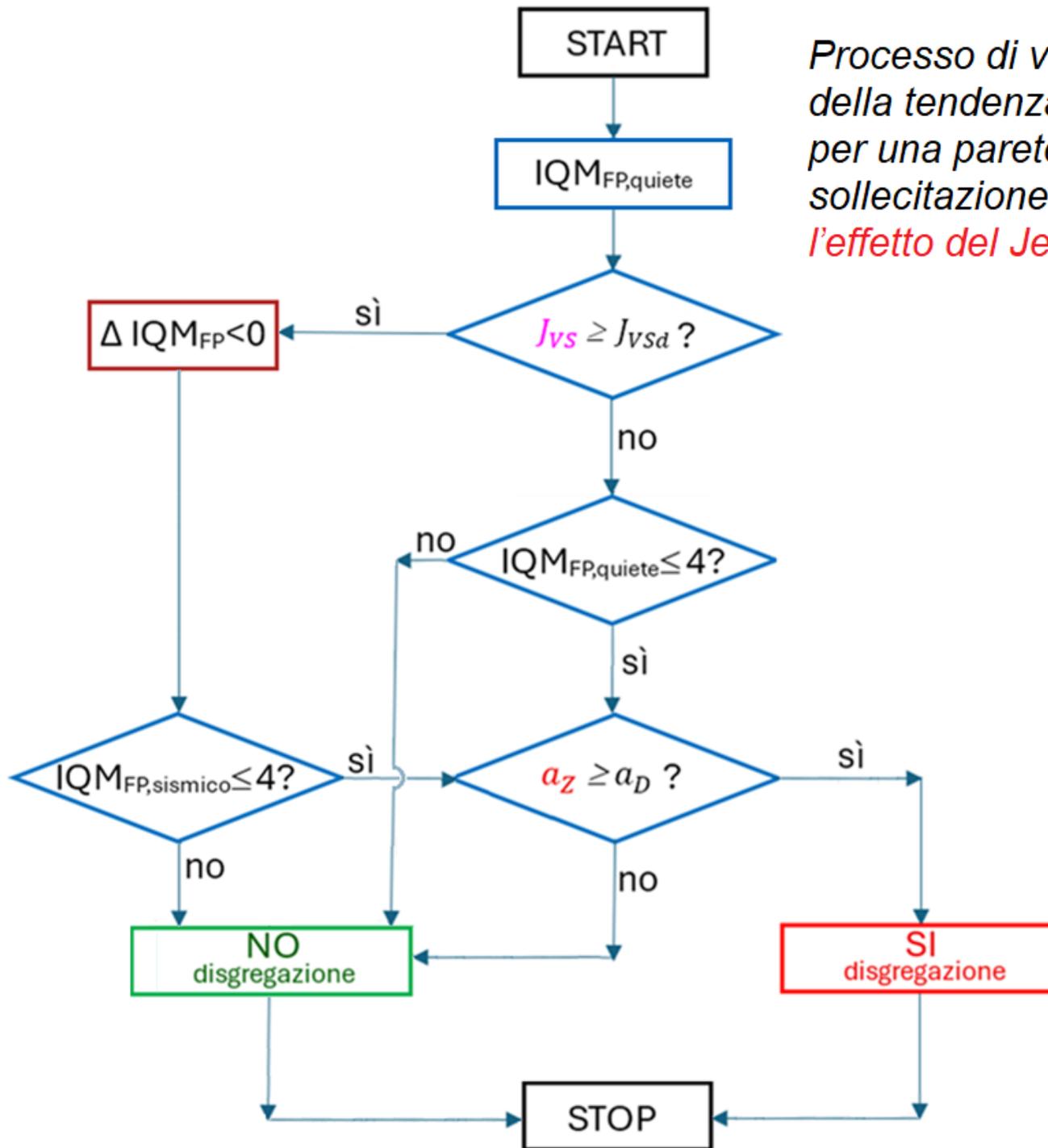


JERK



La qualità muraria può modificarsi durante l'evento sismico \Rightarrow
 in base alla funzione che lega la tendenza alla disgregazione a IQM_{FP},
 anche **la tendenza alla disgregazione può modificarsi nel corso dell'evento**

Processo di valutazione della tendenza alla disgregazione per una parete in muratura sottoposta a sollecitazione sismica *considerando l'effetto del Jerk verticale*



Il processo di valutazione della propensione alla disgregazione si fonda sulla definizione dei seguenti punti fondamentali:

- (1) il valore della **soglia di accelerazione a_D** alla base della parete che determina la disgregazione;
- (2) il valore della **soglia di Jerk verticale strutturale J_{Vsd}** in grado di danneggiare le murature;
- (3) il **criterio di riduzione della qualità muraria** per effetto di un valore del Jerk strutturale J_{VS} superiore alla soglia di danno J_{Vsd} .

Durante l'evento sismico, i picchi di **Jerk verticale e di accelerazione orizzontale** non si manifestano esattamente insieme, ma la loro azione combinata non dipende dal fatto che i picchi vengano raggiunti nello stesso istante: con le sue vibrazioni, **il Jerk effettua una percussione continua che altera il materiale rendendolo più fragile e l'accelerazione, col suo moto inerziale, esalta l'instabilità contribuendo all'espulsione.**

Il fenomeno della disgregazione è quindi il risultato di una combinazione di effetti impulsivi e di azioni inerziali.

Il **criterio di schematizzazione del danneggiamento indotto dal Jerk** si definisce **identificando i parametri della regola dell'arte** sui quali l'azione del Jerk incide **peggiorandone la qualità**.

Si tratta di un approccio necessariamente qualitativo, analogo alle valutazioni sui materiali condotte mediante IQM, che può essere ragionevolmente inquadrato tenendo presenti i parametri della regola dell'arte legati alla disgregazione:

MA = qualità della malta / efficace contatto fra elementi / zeppe;

PD = ingranamento trasversale / presenza dei diatoni (connessioni trasversali tra paramenti);

OR = orizzontalità dei filari (presenza o assenza di ricorsi o listature).

L'azione disgregatrice sulla malta è l'effetto principale delle vibrazioni verticali, insieme alla dislocazione degli elementi lapidei che come conseguenza peggiora l'eventuale connessione trasversale preesistente e altera, quando presente in origine, l'orizzontalità dei filari.

IQM, basandosi sull'osservazione dei paramenti e della sezione muraria, viene determinato valutando il rispetto o meno delle regole dell'arte e i possibili giudizi per ciascun parametro sono:

R = rispettato; PR = parzialmente rispettato; NR = non rispettato.

Vengono quindi definite **3 classi per ogni parametro**;

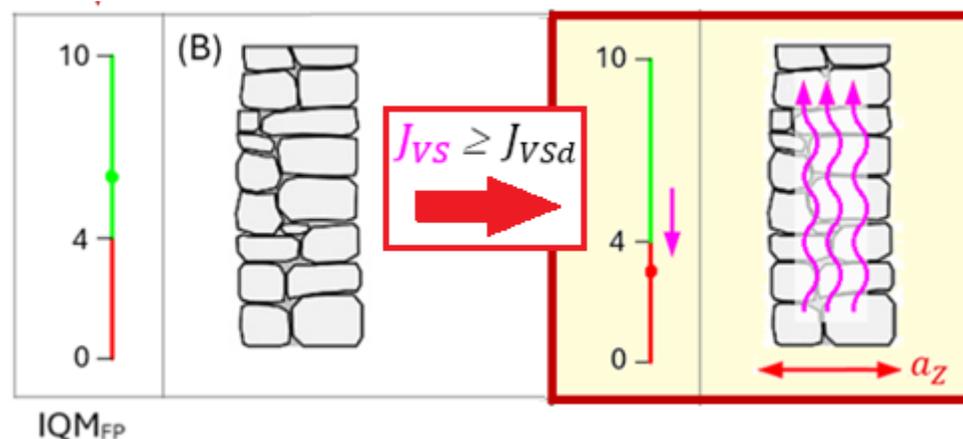
tranne che per la malta, per la quale è prevista una classe aggiuntiva, corrispondente alla malta di qualità pessima (4 classi di qualità).

L'azione negativa del Jerk sulla qualità muraria si può schematizzare con la **riduzione della classe di appartenenza**, operando distintamente per i 3 parametri di riferimento e amplificando gli effetti nel caso di valori più elevati del Jerk

Affinché si manifesti un cambiamento significativo su PD e OR, il Jerk deve assumere valori più elevati rispetto a quanto necessario per il processo di impoverimento della malta; inoltre è opportuno operare una distinzione fra le tipologie:

- **murature irregolari**, caratterizzate da conci senza lavorazione (pietrame disordinato);
- **murature a conci sbozzati**;
- **murature con tessitura regolare**: anche queste possono essere soggette agli effetti disgregativi, come ad esempio nel caso di giunti di malta di ampio spessore.

Inoltre, a valori molto elevati di Jerk verticale si associa la riduzione al valore minimo (nullo) dell'indice di qualità muraria fuori piano.



Definizione del superamento da parte di J_{VS} della soglia di danno J_{Vsd}

Murature irregolari, in pietrame disordinato (J_{VS} in g/s)				
	$10 \leq J_{VS} < 20$	$20 \leq J_{VS} < 30$	$30 \leq J_{VS} < 40$	$J_{VS} \geq 40$
MA	-1	-2	-3	IQM _{FP} = 0, $a_D = 0.150$ g
PD	0	-1	-2	
OR	0	-1	-2	

I valori di **soglia di danno del Jerk verticale strutturale J_{Vsd}** vengono definiti in Tabella attraverso intervalli di 10 g/s, a partire da 10 g/s fino 60 g/s e oltre

Murature a conci sbozzati (J_{VS} in g/s)					
	$10 \leq J_{VS} < 20$	$20 \leq J_{VS} < 30$	$30 \leq J_{VS} < 40$	$40 \leq J_{VS} < 50$	$J_{VS} \geq 50$
MA	0	-1	-2	-3	IQM _{FP} = 0, $a_D = 0.150$ g
PD	0	0	-1	-2	
OR	0	0	-1	-2	

Murature con tessitura regolare (J_{VS} in g/s)						
	$10 \leq J_{VS} < 20$	$20 \leq J_{VS} < 30$	$30 \leq J_{VS} < 40$	$40 \leq J_{VS} < 50$	$50 \leq J_{VS} < 60$	$J_{VS} \geq 60$
MA	0	0	-1	-2	-3	IQM _{FP} = 0, $a_D = 0.150$ g
PD	0	0	0	-1	-2	
OR	0	0	0	-1	-2	

Proposta di declassamento dei parametri della regola dell'arte per effetto del Jerk verticale (Mariani e Pugi, CompDyn 2025)

4. IMPLEMENTARE LA **VERIFICA DI DISGREGAZIONE** NELLE ANALISI GLOBALI DI VULNERABILITA'

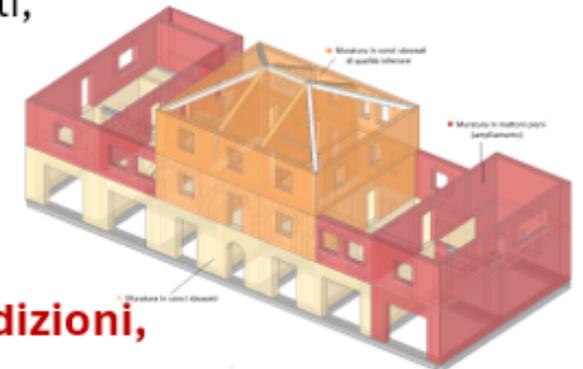
ESEMPIO APPLICATIVO: STUDIO DEI MECCANISMI DI DISGREGAZIONE

La valutazione dei meccanismi di disgregazione viene eseguita su un **edificio esistente in muratura** che si ipotizza ubicato in **due diverse zone sismiche** soggette ad eventi rilevanti: Fivizzano (MS) e, a più alta sismicità, Amatrice (RI).

L'edificio è costituito da 3 piani fuori terra con una parte realizzata a piano terra in una prima fase costruttiva e con successivi ampliamenti in elevazione e in pianta.

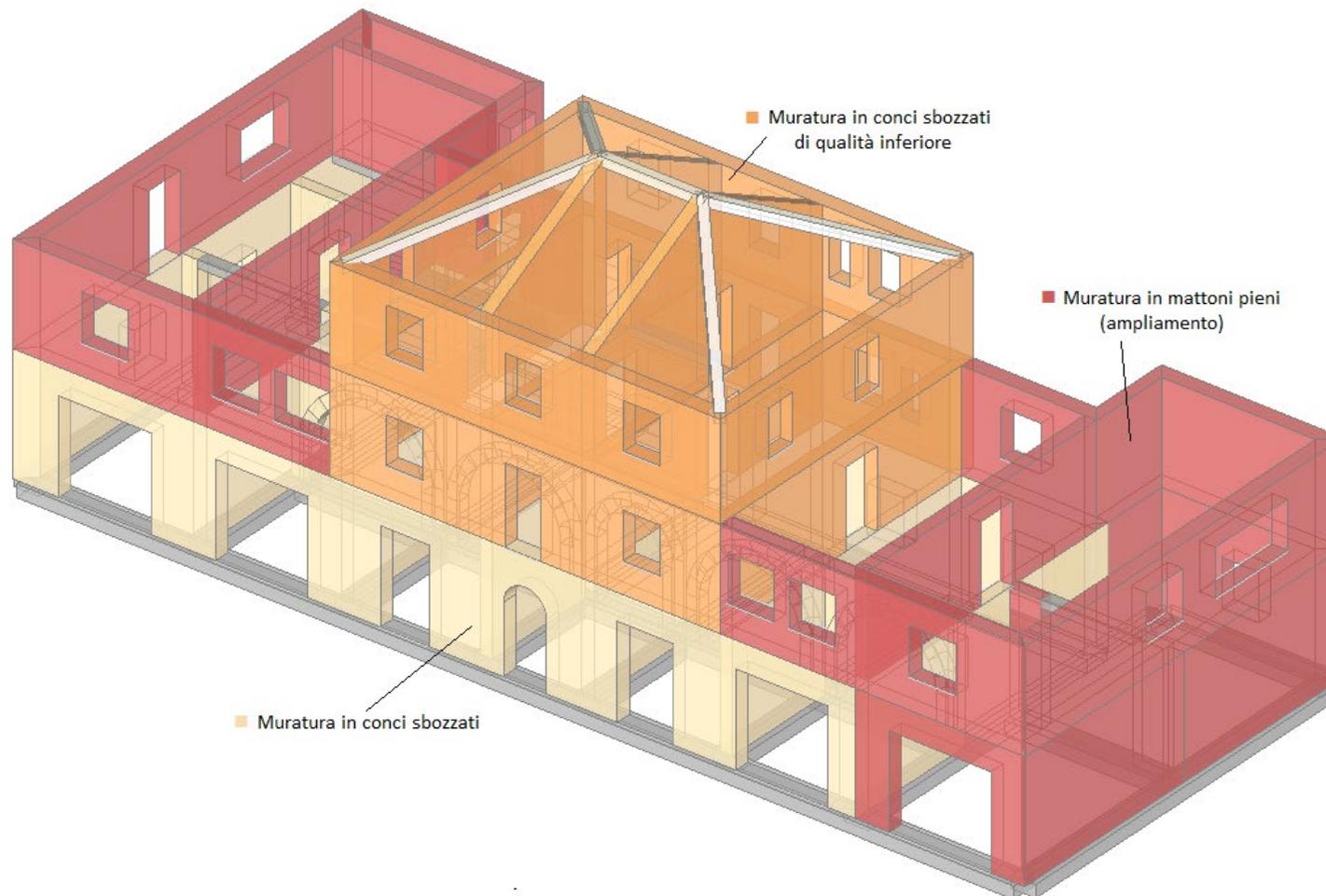
La struttura muraria originaria, nella parte centrale del piano terra, è in conci sbozzati; anche la **successiva sopraelevazione** è stata realizzata in conci sbozzati, ma di qualità minore a causa dell'assenza di diatoni.

L'**ampliamento laterale** è in mattoni pieni e malta di calce, con giunti di ampio spessore (superiore a 13 mm)



Tutte le murature potrebbero essere influenzate, in determinate condizioni, dagli effetti delle vibrazioni sismiche.

NB: Da rilevare che non si è considerato un esempio con muratura in pietrame di scarsa qualità, che risulta in sé soggetta a disgregazione: l'obiettivo è mostrare come **anche murature originariamente di qualità modesta ma non disordinate** possano essere **influenzate dai contenuti ad alta frequenza** attraverso un peggioramento della qualità da essi indotto.



Si richiede la valutazione della vulnerabilità dello stato di fatto e di un progetto di intervento di miglioramento con il vincolo di un **incremento di indicatore di rischio sismico $\Delta\zeta_E \geq 0.10$** .

Il committente richiede inoltre un livello di sicurezza maggiore per la disgregazione: si deve accertare che l'intervento di progetto assicuri l'adeguamento nei confronti della disgregazione, considerando come obiettivo un corrispondente indicatore di rischio sismico $\zeta_E \geq 0.80$.

L'analisi di vulnerabilità sismica è stata eseguita
con il software **Aedes.PCM**



L'esempio applicativo illustrato nel presente lavoro è stato svolto utilizzando **Aedes.PCM versione 2026***, che implementa le seguenti funzionalità: accelerazione soglia di disgregazione funzione di IQM fuori piano e gestione dell'eventuale declassamento sismico della qualità muraria per effetto del jerk. Nella versione 2025 la verifica di disgregazione viene eseguita assumendo un valore generale per l'accelerazione a_D soglia di disgregazione

(* data di rilascio: gennaio 2026)

L'analisi dell'edificio, contenente la **verifica di sicurezza nei confronti della disgregazione**, si articola nelle seguenti schematizzazioni:

(A.1, A.2) **Stato di fatto, senza considerare gli effetti da Jerk**, rispettivamente a Fivizzano e Amatrice;

(A.3, A.4) **Stato di fatto, considerando gli effetti da Jerk**, rispettivamente a Fivizzano e Amatrice;

(A.5) **Stato di progetto, con intervento di consolidamento**, focalizzato sul caso di Amatrice.

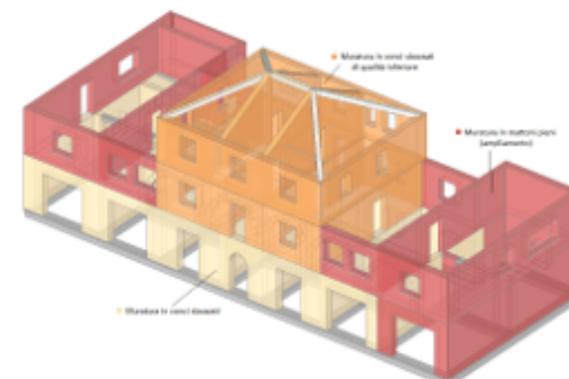
Per tutti i modelli vengono eseguite la verifica di disgregazione e le analisi cinematica e pushover, secondo la **gerarchia dei meccanismi di collasso**.

L'analisi pushover include gli effetti dell'accelerazione sismica verticale, secondo la metodologia messa a punto da Mariani e Pugi (vd. bibliografia).
Fra i **parametri della regola dell'arte di IQM**, come in precedenza osservato, quelli **interessati dalla disgregazione** sono:

P.D. = Presenza di Diatoni, ingranamento trasversale,

MA. = qualità della MALta, efficace contratto fra elementi, zeppe,

OR. = ORizzontalità dei filari.



NB. La numerazione delle figure nelle slide successive fa riferimento al testo dell'articolo di Mariani e Pugi: ***Accelerazione, Jerk e disgregazione muraria: effetti sismici sugli edifici esistenti in muratura***, pubblicato da CompDyn 2025 (vd. note bibliografiche) e in versione italiana da Ingenio, dove gli esempi possono essere consultati in dettaglio.

		Analisi Statica			Analisi Sismica					
Parametri della Regola dell'Arte										
		NR	PR	R	NR	PR	R	Valutazioni quantitative		
Presenza Diatoni	P.D.	[Progress bar: PR]			[Progress bar: PR]			<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato trasversale (cm)	110	
Malta Efficace	MA.	[Progress bar: PR]			[Progress bar: PR]			<input type="checkbox"/> Malta di pessima qualità		
Forma Elementi	F.EL.	[Progress bar: PR]			[Progress bar: PR]			<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato frontale (cm)	122	Paramento B 122
Sfalsamento Giunti	S.G.	[Progress bar: NR]			[Progress bar: NR]			<input type="checkbox"/> Dimensione massima degli elementi (cm)	30	
Resistenza Elementi	R.EL.			[Progress bar: R]			[Progress bar: R]			
Orizzontalità dei filari	OR.	[Progress bar: PR]			[Progress bar: PR]					
Dimensione degli elementi	D.EL.	[Progress bar: PR]			[Progress bar: PR]					
Indici di Qualità Muraria										
Azioni Verticali	IQM_V	4.50	B		4.50	B				
Azioni Fuori Piano	IQM_{FP}	4.50	B		4.50	B				
Azioni Nel Piano	IQM_{NP}	4.00	B		4.00	B				
Proprietà meccaniche (N/mm²)										
		IQM			IQM			NTC		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
Modulo di elasticità normale	E	1223	1479	1733	1223	1479	1733	1020	1230	1440
Modulo di elasticità tangenziale	G	376	453	530	376	453	530	340	410	480
Resistenza media a compressione	f_m	2.521	3.282	4.032	2.521	3.282	4.032	2.000	2.500	3.000
Resistenza media a taglio (irregolare)	τ_0	0.047	0.062	0.077	0.047	0.062	0.077	0.035	0.043	0.051
Resistenza media a taglio (regolare)	f_v0									

Fig. 17. IQM per la muratura a conci sbazzati del piano terra

In Fig. 17 si rileva $IQM_{FP} = 4.50 > 4$: le pareti costituite da questa tipologia di muratura, a conci sbazzati, non sono mai soggette a disgregazione (potrebbero diventarlo in seguito a un degrado della qualità muraria prodotto dal Jerk, come sarà illustrato in seguito).

		Analisi Statica			Analisi Sismica					
Parametri della Regola dell'Arte										
		NR	PR	R	NR	PR	R	Valutazioni quantitative		
Presenza Diatoni	P.D.							<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato trasversale (cm)	<input type="text" value="110"/>	
Malta Efficace	MA.							<input type="checkbox"/> Malta di pessima qualità		
Forma Elementi	F.EL.							<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato frontale (cm)	<input type="text" value="122"/>	Paramento B <input type="text" value="122"/>
Sfalsamento Giunti	S.G.							<input type="checkbox"/> Dimensione massima degli elementi (cm)	<input type="text" value="30"/>	
Resistenza Elementi	R.EL.									
Orizzontalità dei filari	OR.									
Dimensione degli elementi	D.EL.									
Indici di Qualità Muraria										
Azioni Verticali	IQM_V	2.50	B		2.50	B		$IQM_{FP} < 4 \rightarrow$ Possibile disgregazione muraria con sismi di elevata intensità. Accelerazione di attivazione della Disgregazione: $a_D = 0.300 g$		
Azioni Fuori Piano	IQM_{FP}	2.00	C		2.00	C				
Azioni Nel Piano	IQM_{NP}	2.50	C		2.50	C				
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}									

Fig. 18. IQM per la muratura a conci sbozzati di scarsa qualità presente ai piani primo e ultimo

In Fig. 18 si rileva $IQM_{FP} = 2.00 < 4$: le pareti costituite da muratura a conci sbozzati di scarsa qualità devono essere sottoposte a verifica di disgregazione in caso di accelerazioni sismiche di elevata intensità, indipendentemente dal Jerk. Più precisamente, l'accelerazione soglia di attivazione della disgregazione a_D per questa muratura è valutata attraverso la relazione illustrata in precedenza, e vale 0.300 g.

		Analisi Statica			Analisi Sismica					
Parametri della Regola dell'Arte										
		NR	PR	R	NR	PR	R	Valutazioni quantitative		
Presenza Diatoni	P.D.							<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato trasversale (cm)	100	
Malta Efficace	MA.							<input type="checkbox"/> Malta di pessima qualità		
Forma Elementi	F.EL.							<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato frontale (cm)	100	Paramento B 100
Sfalsamento Giunti	S.G.							<input type="checkbox"/> Dimensione massima degli elementi (cm)	25	
Resistenza Elementi	R.EL.									
Orizzontalità dei filari	OR.									
Dimensione degli elementi	D.EL.									
Indici di Qualità Muraria										
Azioni Verticali	IQM_V	2.94	B		2.94	B				
Azioni Fuori Piano	IQM_{FP}	4.20	B		4.20	B				
Azioni Nel Piano	IQM_{NP}	3.87	B		3.87	B				
Proprietà meccaniche (N/mm²)										
		IQM			IQM			NTC		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
Modulo di elasticità normale	E	960	1163	1366	960	1163	1366	960	1200	1440
Modulo di elasticità tangenziale	G	369	445	520	369	445	520	320	400	480
Resistenza media a compressione	f_m	1.860	2.464	3.060	1.860	2.464	3.060	1.820	2.415	3.010
Resistenza media a taglio (irregolare)	τ_0	0.046	0.061	0.075	0.046	0.061	0.075	0.035	0.063	0.091
Resistenza media a taglio (regolare)	f_{v0}	0.108	0.156	0.204	0.108	0.156	0.204	0.091	0.140	0.189

Fig. 19. IQM per la muratura di mattoni pieni con giunti di ampio spessore (> 13 mm) presente nella zona di ampliamento dell'edificio

In Fig. 19 si rileva $IQM_{FP} = 4.20 > 4$: le pareti costituite da questo tipo di muratura in mattoni pieni non sono mai soggette a disgregazione (potrebbero diventarlo in seguito a un degrado della qualità muraria prodotto dal Jerk, come sarà illustrato in seguito).

Modello (A.1) (sito: Fivizzano, non si considerano gli effetti del Jerk)

L'edificio ha coefficiente topografico $S_T=1.00$.

Per la componente sismica orizzontale, si ha: $PGA_H = a_g S_S S_T = 0.200 \cdot 1.411 \cdot 1.00 = \mathbf{0.282 g}$.

In base ai valori di IQM_{FP} per le diverse tipologie murarie, **la verifica di disgregazione deve essere eseguita sulle pareti con muratura a conci sbozzati di minore qualità poste ai piani primo e secondo.**

L'accelerazione alla base delle pareti viene valutata tramite spettro di piano.

Per le pareti dell'ultimo piano, con quota di base $z = 7.100$ m, l'accelerazione spettrale è data da:

$$a_z(7.1) = S_e(T_1, \xi) \cdot \gamma_1 \cdot \psi_1(z) \cdot \sqrt{1 + 0.0004\xi^2} \quad (3.1)$$

dove:

T_1 è il periodo fondamentale di vibrazione della costruzione, che viene qui stimato attraverso la relazione

$$T_1 = C_1 H^{3/4} = 0.05 \cdot (10.2)^{3/4} = 0.285 \text{ s (con } H = 10.2 \text{ m altezza complessiva della costruzione);}$$

poiché: $T_B = 0.149$ s e $T_C = 0.447$ s si ha:

$$T_B \leq T_1 < T_C ;$$

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

$$a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_O = 0.200 \cdot 1.411 \cdot 1.0 \cdot 2.412 = 0.680 \text{ g};$$

γ_1 è il coefficiente di partecipazione modale del modo fondamentale di vibrazione assunto pari a $\gamma_1 =$

$$\frac{3N}{2N+1} = 1.286 \text{ (dove } N = 3 \text{ è il numero di piani della costruzione);}$$

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

I maschi murari dell'ultimo piano sono investiti da un'accelerazione spettrale alla base pari a:

$$a_z(7.1) = 0.680 \cdot 1.286 \cdot 0.696 \cdot \sqrt{1 + 0.0004 \cdot 5^2} = \mathbf{0.612g} \quad (3.2)$$

Alla domanda in termini di $PGA = a_g \cdot S = 0.282 \text{ g}$ corrisponde quindi l'accelerazione spettrale **0.612g**.

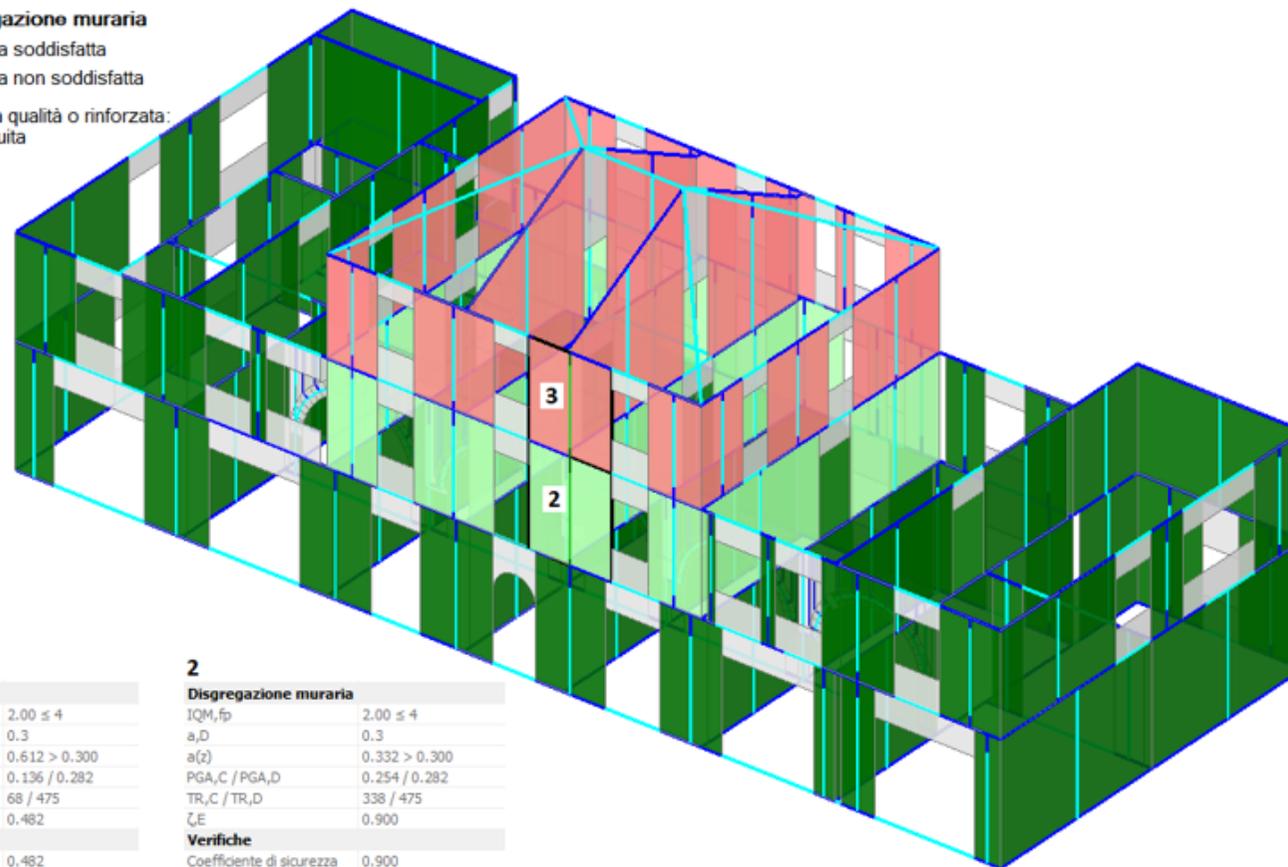
La soglia di attivazione della disgregazione è vista come "capacità";

per la muratura a conci sbalzati di minore qualità è stata valutata $a_D=0.300 \text{ g}$.

Il risultato della verifica di disgregazione è riportato in Fig. 20. Le pareti in colore verde scuro non sono soggette a disgregazione avendo $IQM_{FP} > 4$; le pareti in colore verde chiaro sono sottoposte a verifica di disgregazione, che risulta soddisfatta; le pareti in colore rosso sono soggette a disgregazione. Nell'immagine, sono riportati in dettaglio i risultati della verifica per due pareti rappresentative: la n.3 dell'ultimo piano, con verifica non soddisfatta, e la n.2 del piano primo, con verifica soddisfatta.

Verifica di disgregazione muraria

- $\zeta_E \geq 0.800$: Verifica soddisfatta
- $\zeta_E < 0.800$: Verifica non soddisfatta
- Muratura di buona qualità o rinforzata: Verifica non eseguita



3

Disgregazione muraria

IQM_{fp}	$2.00 \leq 4$
a_{D}	0.3
$a(z)$	$0.612 > 0.300$
PGA_{C} / PGA_{D}	$0.136 / 0.282$
TR_{C} / TR_{D}	$68 / 475$
ζ_E	0.482

Verifiche

Coefficiente di sicurezza	0.482
Verifica	Non soddisfatta

2

Disgregazione muraria

IQM_{fp}	$2.00 \leq 4$
a_{D}	0.3
$a(z)$	$0.332 > 0.300$
PGA_{C} / PGA_{D}	$0.254 / 0.282$
TR_{C} / TR_{D}	$338 / 475$
ζ_E	0.900

Verifiche

Coefficiente di sicurezza	0.900
Verifica	Soddisfatta

Fig. 20. Modello (A.1): verifica di disgregazione

La **sintesi dei risultati** ottenuti eseguendo tutte le analisi (nei modelli presentati si omettono, per semplicità, i dettagli su analisi per cinematismi e pushover) è riportata in Tab. IV. L'analisi completa valuta tutte le possibili fonti di crisi mediante l'applicazione della gerarchia dei meccanismi, fondamentale - come già rilevato - per la valutazione delle capacità antisismiche di edifici esistenti in muratura [4,5,6,7].

La disgregazione muraria abbatta l'indicatore di rischio sismico da 0.585, ottenuto con l'analisi dei meccanismi di collasso, a 0.482. Ciò significa che **trascuando il meccanismo di disgregazione, si sovrastimerebbe la capacità dell'edificio allo stato di fatto**: la disgregazione riduce l'indicatore di rischio sismico (-17.6%) e precede i comportamenti per resistenza locale (cinematismi) e globale (pushover) rendendone di fatto impossibile la manifestazione.

SLV: Disgregazione muraria	0.482
SLV: Cinematismo	0.585
SLV: Pushover	0.752

Tab. IV. Modello (A.1): sintesi dei risultati con gerarchia dei meccanismi

Modello (A.2) (sito: Amatrice, non si considerano gli effetti del Jerk)

Rispetto al modello precedente, restano invariati i dati strutturali e vengono aggiornati i parametri sismici.

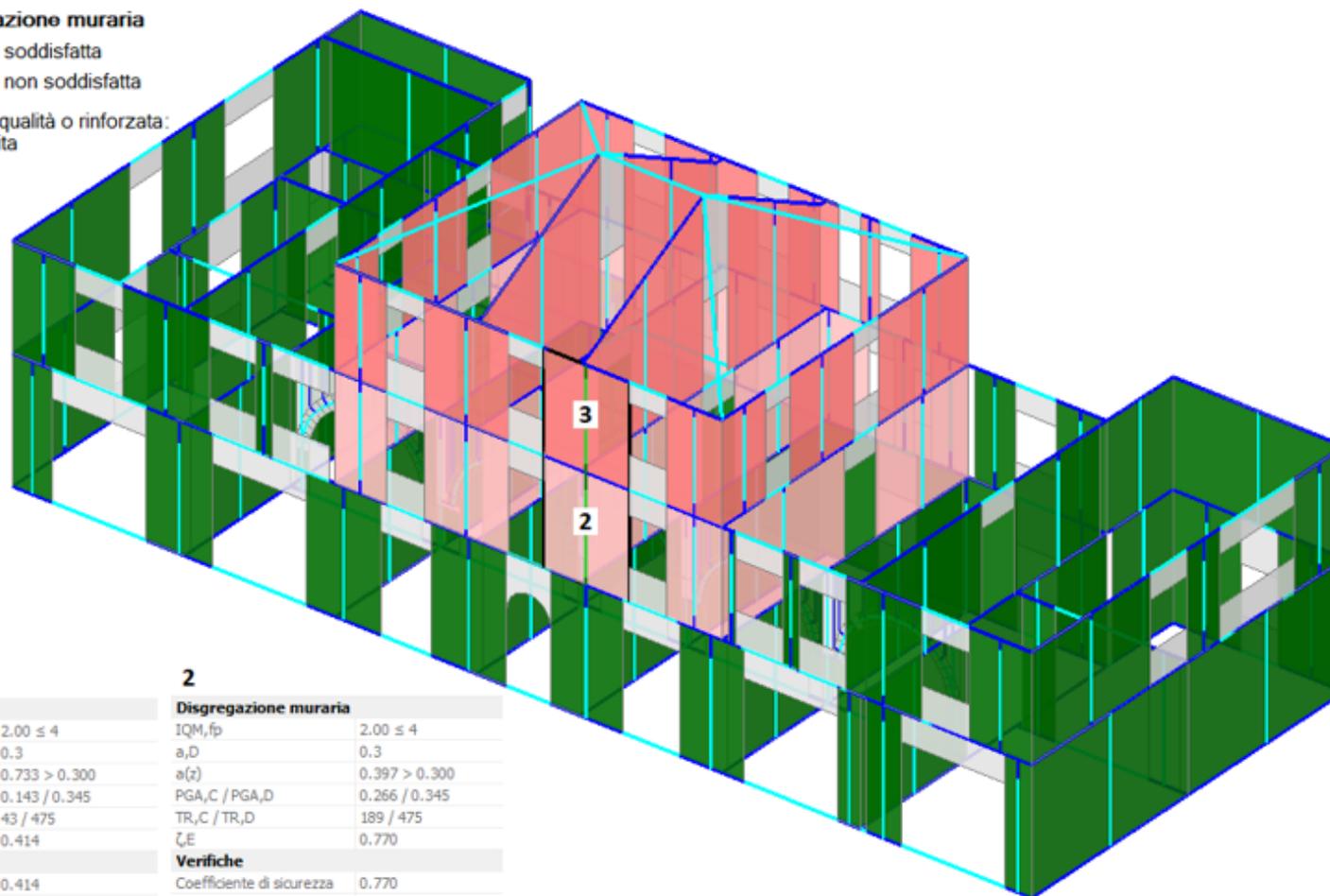
Per la componente sismica orizzontale, si ha:

$$PGA_H = a_{g, S_S} S_T = 0.259 \cdot 1.333 \cdot 1.00 = 0.345 \text{ g.}$$

Applicando un percorso analogo al modello (A.1) si ottengono i risultati riportati in Fig. 21 e in Tab. V.

Verifica di disgregazione muraria

- $\zeta_E \geq 0.800$: Verifica soddisfatta
- $\zeta_E < 0.800$: Verifica non soddisfatta
- Muratura di buona qualità o rinforzata: Verifica non eseguita



3		2	
Disgregazione muraria		Disgregazione muraria	
IQM,fp	2.00 ≤ 4	IQM,fp	2.00 ≤ 4
a,D	0.3	a,D	0.3
a(z)	0.733 > 0.300	a(z)	0.397 > 0.300
PGA,C / PGA,D	0.143 / 0.345	PGA,C / PGA,D	0.266 / 0.345
TR,C / TR,D	43 / 475	TR,C / TR,D	189 / 475
ζE	0.414	ζE	0.770
Verifiche		Verifiche	
Coefficiente di sicurezza	0.414	Coefficiente di sicurezza	0.770
Verifica	Non soddisfatta	Verifica	Non soddisfatta

Fig. 21. Modello (A.2): verifica di disgregazione

SLV: Disgregazione muraria	0.414
SLV: Cinematismo	0.478
SLV: Pushover	0.626

Tab. V. Modello (A.2): sintesi dei risultati con gerarchia dei meccanismi

Il confronto fra i modelli (A.2) e (A.1) evidenzia gli effetti dell'aumento della pericolosità sismica: **il medesimo edificio di Fivizzano posto ad Amatrice manifesta una disgregazione estesa ai due piani in elevazione.** Analogamente al modello (A.1), trascurando il meccanismo di disgregazione si sovrastimerebbe la capacità dell'edificio allo stato di fatto: la disgregazione riduce ζ_E da 0.478 a 0.414 (-13.4%) e precede i comportamenti per resistenza locale (cinematismi) e globale (pushover) rendendoli fittizi.

Modello (A.3) (sito: Fivizzano, si considerano gli effetti del Jerk)

Per la componente sismica verticale, S_S si assume pari a 1.0. e pertanto:

$PGA_V = a_{gV} S_S S_T = 0.200 \text{ g}$, essendo, secondo la Normativa italiana [2]: $a_{gV} = a_g$.

Applicando la relazione che lega PGJ a PGA, si ottiene il valore del picco di Jerk al suolo:

$PGJ_V = 77.526 \cdot PGA_V - 0.795 = 14.71 \text{ g/s} \Rightarrow 10 < PGJ_V < 15 \text{ g/s}$

Per ottenere il valore del Jerk strutturale di progetto si deve considerare la possibile risonanza: il periodo verticale principale dell'edificio, calcolato nel modello (A.1) risulta $T_{1z}=0.098 \text{ s}$ e risulta un coefficiente di amplificazione pari a 2.5, da cui:

$$J_{VS} = PGJ_V \cdot C_{ampl} = 14.71 \cdot 2.5 = 36.78 \text{ g/s} \Rightarrow 30 \leq J_{VS} < 40 \text{ g/s} \quad (3.3)$$

Murature a conci sbozzati (J_{VS} in g/s)					
	$10 \leq J_{VS} < 20$	$20 \leq J_{VS} < 30$	$30 \leq J_{VS} < 40$	$40 \leq J_{VS} < 50$	$J_{VS} \geq 50$
MA	0	-1	-2	-3	IQM _{FP} = 0, $a_D = 0.150$ g
PD	0	0	-1	-2	
OR	0	0	-1	-2	

In base alla Tab. II, la muratura a conci sbozzati ha una perdita di due classi per il parametro MA, e di una sia per PD sia per OR. Il calcolo di IQM_{FP} sismico viene riportato nelle Figg. 22 e 23, rispettivamente per la muratura del piano terra e per quella di peggiore qualità posta ai piani sovrastanti.

		Analisi Statica			Analisi Sismica					
Parametri della Regola dell'Arte										
Presenza Diatoni	P.D.	NR	PR	R	NR	PR	R	Valutazioni quantitative		
Mata Efficace	MA							<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato trasversale (cm)	110	
Foma Elementi	F.EL.							<input checked="" type="checkbox"/> Mata di pessima qualità		
Sfalsamento Giunti	S.G.							<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato frontale (cm)	122	Paramento B 122
Resistenza Elementi	R.EL.							<input type="checkbox"/> Dimensione massima degli elementi (cm)	30	
Orizzontalità dei filari	OR.									
Dimensione degli elementi	D.EL.									
Indici di Qualità Muraria										
Azioni Verticali	IQM _V	4.50	B		1.40	C		IQM_{FP} ≤ 4 → Possibile disgregazione muraria con sismi di elevata intensità. Accelerazione di attivazione della Disgregazione: $a_D = 0.229$ g		
Azioni Fuori Piano	IQM _{FP}	4.50	B		1.05	C				
Azioni Nel Piano	IQM _{NP}	4.00	B		1.05	C				
Proprietà meccaniche (N/mm²)										
		IQM			IQM			NTC		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
Modulo di elasticità normale	E	1223	1479	1733	756	918	1079	1020	1230	1440
Modulo di elasticità tangenziale	G	376	453	530	247	298	348	340	410	480
Resistenza media a compressione	f _m	2.521	3.282	4.032	1.377	1.857	2.330	2.000	2.500	3.000
Resistenza media a taglio (regolare)	τ ₀	0.047	0.062	0.077	0.023	0.029	0.036	0.035	0.043	0.051
Resistenza media a taglio (regolare)	f _{v0}									

Fig. 22. IQM per la muratura a conci sbozzati del piano terra, considerando l'effetto del Jerk (Fivizzano)

		Analisi Statica			Analisi Sismica					
Parametri della Regola dell'Arte										
		NR	PR	R	NR	PR	R	Valutazioni quantitative		
Presenza Diatoni	P.D.	█	█	█	█	█	█	<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato trasversale (cm)	110	
Malta Efficace	MA.	█	█	█	█	█	█	<input checked="" type="checkbox"/> Malta di pessima qualità		
Forma Elementi	F.EL.	█	█	█	█	█	█	<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato frontale (cm)	122	Paramento B 122
Sfalsamento Giunti	S.G.	█	█	█	█	█	█	<input type="checkbox"/> Dimensione massima degli elementi (cm)	30	
Resistenza Elementi	R.EL.	█	█	█	█	█	█			
Orizzontalità dei filari	OR.	█	█	█	█	█	█			
Dimensione degli elementi	D.EL.	█	█	█	█	█	█			
Indici di Qualità Muraria										
Azioni Verticali	IQM_V	2.50	B		1.40	C		$IQM_{FP} < 4 \rightarrow$ Possibile disgregazione muraria con sismi di elevata intensità. Accelerazione di attivazione della Disgregazione: $a_D = 0.229 g$		
Azioni Fuori Piano	IQM_{FP}	2.00	C		1.05	C				
Azioni Nel Piano	IQM_{NP}	2.50	C		1.05	C				
Proprietà meccaniche (N/mm²)										
		IQM			IQM			NTC		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
Modulo di elasticità normale	E	897	1087	1277	756	918	1079	1020	1230	1440
Modulo di elasticità tangenziale	G	303	366	428	247	298	348	340	410	480
Resistenza media a compressione	f _m	1.707	2.273	2.831	1.377	1.857	2.330	2.000	2.500	3.000
Resistenza media a taglio (irregolare)	τ ₀	0.034	0.045	0.055	0.023	0.029	0.036	0.035	0.043	0.051
Resistenza media a taglio (regolare)	f _{v0}									

Fig. 23. IQM per la muratura a conci sbazzati di scarsa qualità presente ai piani primo e ultimo, considerando l'effetto del Jerk (Fivizzano)

Entrambe le tipologie di muratura a conci sbazzati presenti nell'edificio vengono declassate fino ai più bassi valori possibili di IQM_{FP} , in quanto ogni parametro può degradare solo fino al suo livello di qualità minimo. Ad esempio, per la muratura di migliore qualità (Fig. 22) si osserva che il parametro PD originariamente PR, perde una classe e scende a NR, mentre per l'altra tipologia di conci sbazzati (Fig. 23) PD era già inizialmente pari a NR e non può scendere ancora: in entrambi i casi il parametro PD atterra sul valore NR. Il risultato è che IQM_{FP} si uniforma per le due tipologie a conci sbazzati al valore 1.05, cui corrisponde in base alla (2.1) $a_D = 0.229 g$.

Murature con tessitura regolare (J_{VS} in g/s)						
	$10 \leq J_{VS} < 20$	$20 \leq J_{VS} < 30$	$30 \leq J_{VS} < 40$	$40 \leq J_{VS} < 50$	$50 \leq J_{VS} < 60$	$J_{VS} \geq 60$
MA	0	0	-1	-2	-3	$IQM_{FP} = 0,$ $a_D = 0.150 \text{ g}$
PD	0	0	0	-1	-2	
OR	0	0	0	-1	-2	

Per quanto riguarda **la muratura a mattoni pieni**, la Tab. III indica, in corrispondenza di $J_{VS}=36.78 \text{ g/s}$, **la perdita di una classe per il parametro MA, senza altri effetti.**

La Fig. 24 riporta il calcolo di IQM per i mattoni pieni con il degrado del parametro MA, che determina la discesa di IQM_{FP} da 4.20 a 3.85, sotto alla soglia di 4: la muratura a mattoni pieni, per effetto del Jerk, diviene soggetta a possibile disgregazione e nella verifica corrispondente si dovrà considerare un'accelerazione di attivazione $a_D = 0.439 \text{ g}$.

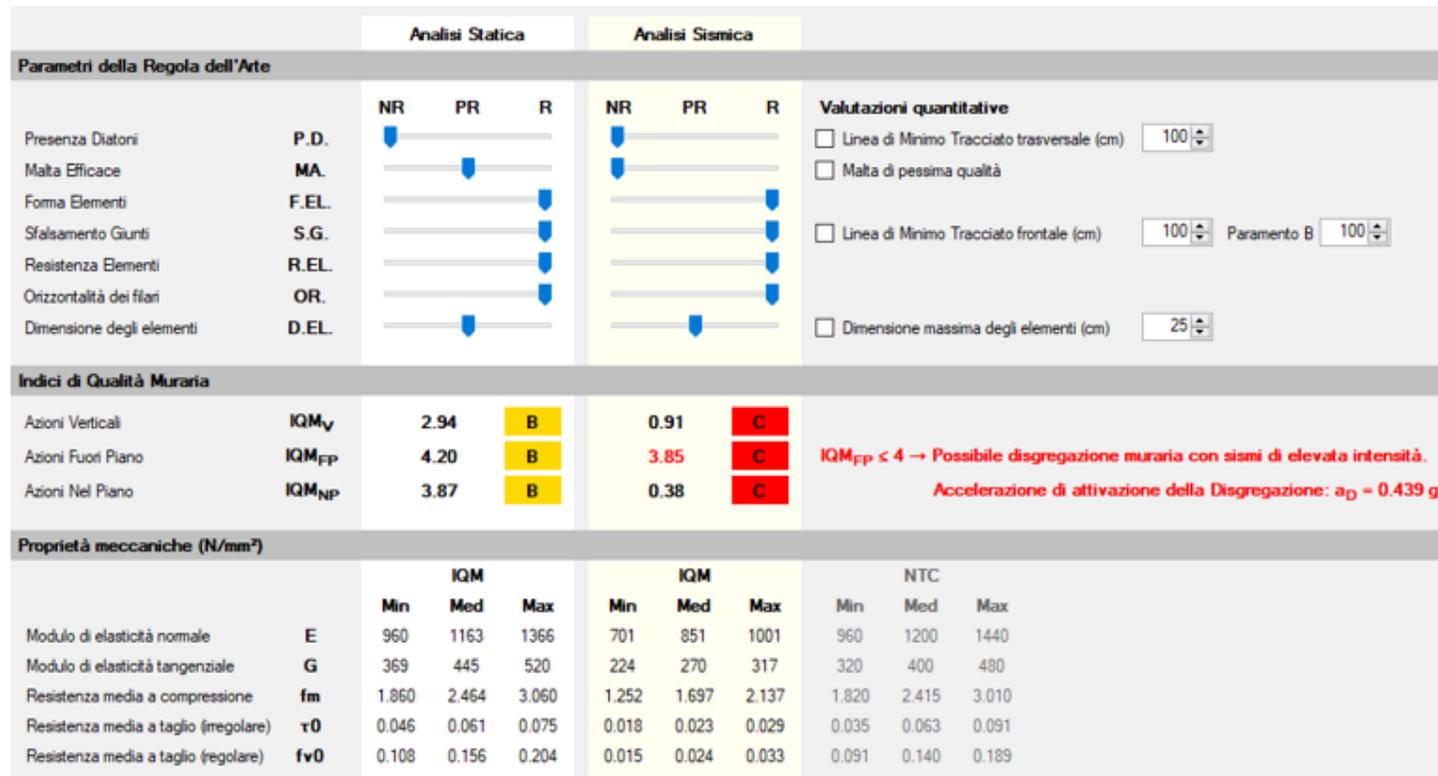
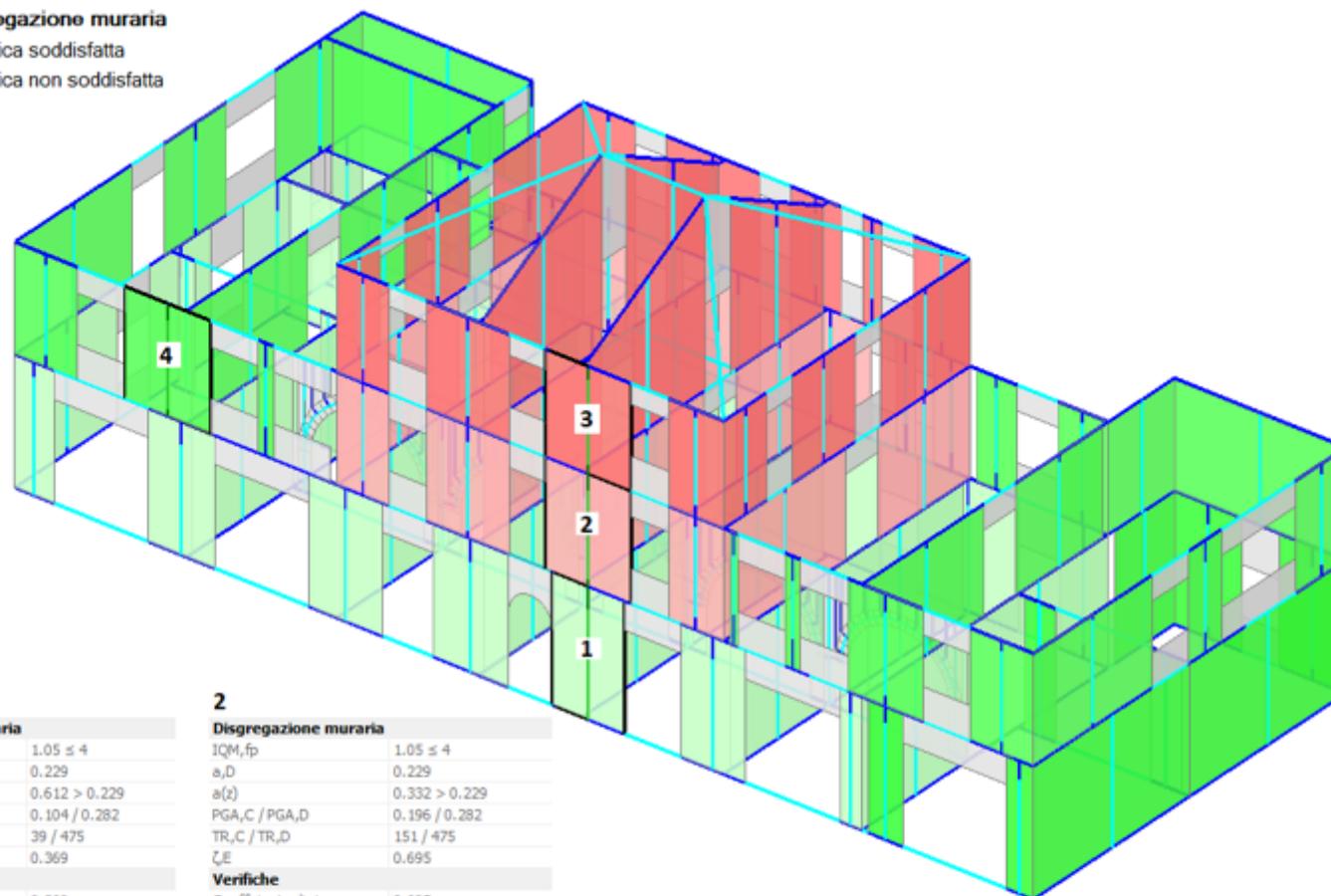


Fig. 24. IQM per la muratura di mattoni pieni con giunti di ampio spessore ($> 13 \text{ mm}$) presente nella zona di ampliamento dell'edificio, considerando l'effetto del Jerk (Fivizzano)

Verifica di disgregazione muraria

- $\zeta_E \geq 0.800$: Verifica soddisfatta
- $\zeta_E < 0.800$: Verifica non soddisfatta



3

Disgregazione muraria	
IQM,fp	1.05 ≤ 4
a,D	0.229
a(z)	0.612 > 0.229
PGA,C / PGA,D	0.104 / 0.282
TR,C / TR,D	39 / 475
ζ_E	0.369
Verifiche	
Coefficiente di sicurezza	0.369
Verifica	Non soddisfatta

2

Disgregazione muraria	
IQM,fp	1.05 ≤ 4
a,D	0.229
a(z)	0.332 > 0.229
PGA,C / PGA,D	0.196 / 0.282
TR,C / TR,D	151 / 475
ζ_E	0.695
Verifiche	
Coefficiente di sicurezza	0.695
Verifica	Non soddisfatta

1

Disgregazione muraria	
IQM,fp	1.05 ≤ 4
a,D	0.229
a(z)	0.282 > 0.229
PGA,C / PGA,D	0.228 / 0.282
TR,C / TR,D	235 / 475
ζ_E	0.808
Verifiche	
Coefficiente di sicurezza	0.808
Verifica	Soddisfatta

4

Disgregazione muraria	
IQM,fp	3.85 ≤ 4
a,D	0.439
a(z)	0.332 ≤ 0.439
PGA,C / PGA,D	0.374 / 0.282
TR,C / TR,D	1480 / 475
ζ_E	1.325
Verifiche	
Coefficiente di sicurezza	1.325
Verifica	Soddisfatta

Fig. 25. Modello (A.3): verifica di disgregazione considerando l'effetto del Jerk (Fivizzano)

Confrontando risultati della verifica di disgregazione ottenuti considerando gli effetti del Jerk (Modello (A.3) in Fig. 25) con quelli del Modello (A.1) in Fig. 20 senza tali effetti, si osservano le seguenti variazioni:

- **tutte le pareti, incluse quelle in mattoni pieni, mostrano in fase sismica una qualità muraria favorevole al meccanismo di disgregazione: non c'è più nessuna parete per la quale sia possibile escludere a priori tale comportamento;**

- **diversamente dal caso senza Jerk, le pareti in conci sbozzati del piano intermedio (piano primo) hanno verifica di disgregazione non soddisfatta: la disgregazione si estende quindi dal piano di sommità verso quello sottostante.**

Nell'immagine, sono riportati in dettaglio i risultati della verifica per quattro pareti rappresentative: la n.3 dell'ultimo piano, con verifica non soddisfatta, la n.2 del piano primo, con verifica non soddisfatta, la n.1 del piano terra, con verifica soddisfatta e la n.4 del piano primo (zona ampliamento) con verifica soddisfatta.

In Tab. VI sono riportati i risultati di tutte le analisi.

SLV: Disgregazione muraria	0.369
SLV: Cinematismo	0.585
SLV: Pushover	0.617

Tab. VI. Modello (A.3): sintesi dei risultati con gerarchia dei meccanismi considerando per la disgregazione l'effetto del Jerk (Fivizzano)

In sintesi, gli effetti del Jerk sulla verifica di disgregazione sono rappresentati in Fig. 26: l'immagine evidenzia la maggior importanza dei meccanismi di disgregazione passando dal modello (A.1) al modello (A.3).

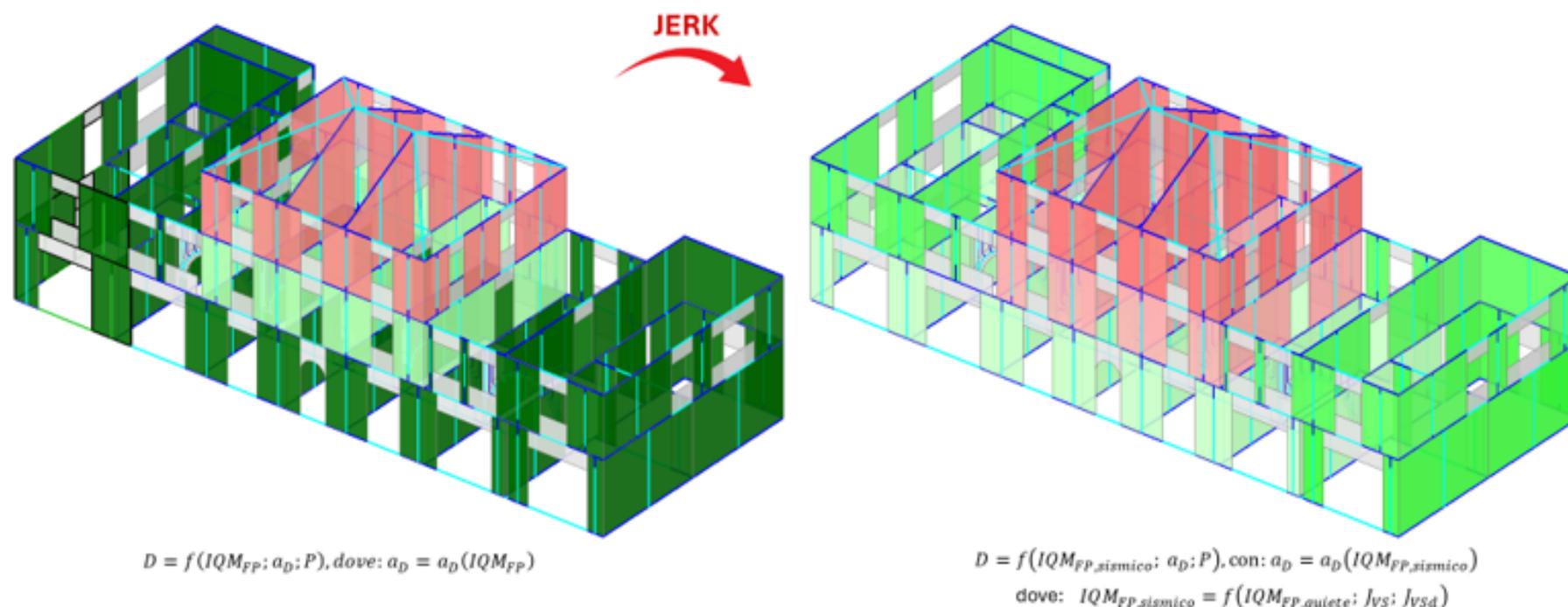


Fig. 26. Effetti del Jerk sulla possibile disgregazione nell'analisi di vulnerabilità dello stato di fatto per l'edificio di esempio posto a Fivizzano

La Tab. VI mostra che la disgregazione muraria considerando l'effetto del Jerk abbate l'indicatore di rischio sismico da 0.585, ottenuto con l'analisi dei meccanismi di collasso, a 0.369 (anziché 0.482 ottenuto senza considerare il Jerk). **Il meccanismo di disgregazione con effetto del Jerk riduce l'indicatore di rischio sismico del 36.9% (anziché 17.6% ottenuto senza considerare il Jerk).**

Modello (A.4) (sito: **Amatrice, si considerano gli effetti del Jerk**)

Per la componente sismica verticale, S_s si assume pari a 1.0. e pertanto:

$PGA_V = a_{gV} S_S S_T = 0.259 \text{ g}$, essendo, secondo la Normativa italiana [2]: $a_{gV} = a_g$.

Applicando la (2.2) si ottiene il valore del picco di Jerk al suolo:

$$PGJ_V = 77.526 \cdot PGA_V - 0.795 = \mathbf{19.28 \text{ g/s}} \Rightarrow 15 < PGJ_V < 20 \text{ g/s}$$

Per ottenere il valore del Jerk strutturale di progetto si deve considerare la possibile risonanza: il periodo verticale principale dell'edificio, calcolato nel modello (A.2) e coincidente con il modello (A.1), è $T_{1z}=0.098 \text{ s}$ e per la (2.5) si ha un coefficiente di amplificazione pari a 2.5, da cui:

$$J_{VS} = PGJ_V \cdot C_{ampl} = \mathbf{19.28 \cdot 2.5 = 48.20 \text{ g/s}} \Rightarrow \mathbf{40 \leq J_{VS} < 50 \text{ g/s}} \quad (3.4)$$

In base alla Tab. II, la muratura a conci sbozzati ha una perdita di tre classi per il parametro MA, e di due sia per PD sia per OR. Il calcolo di IQM_{FP} sismico viene riportato nelle Figg. 27 e 28, rispettivamente per la muratura del piano terra e per quella di peggiore qualità posta ai piani sovrastanti.

		Analisi Statica			Analisi Sismica					
Parametri della Regola dell'Arte										
		NR	PR	R	NR	PR	R	Valutazioni quantitative		
Presenza Diatori	P.D.	[Progressive Scale]			[Progressive Scale]			<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato trasversale (cm)	110	
Malta Efficace	MA.	[Progressive Scale]			[Progressive Scale]			<input checked="" type="checkbox"/> Malta di pessima qualità		
Forma Elementi	F.EL.	[Progressive Scale]			[Progressive Scale]			<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato frontale (cm)	122	Paramento B 122
Sfalsamento Giunti	S.G.	[Progressive Scale]			[Progressive Scale]			<input type="checkbox"/> Dimensione massima degli elementi (cm)	30	
Resistenza Elementi	R.EL.	[Progressive Scale]			[Progressive Scale]					
Orizzontalità dei filari	OR.	[Progressive Scale]			[Progressive Scale]					
Dimensione degli elementi	D.EL.	[Progressive Scale]			[Progressive Scale]					
Indici di Qualità Muraria										
Azioni Verticali	IQM_V	4.50	B		1.40	C		$IQM_{FP} < 4 \rightarrow$ Possibile disgregazione muraria con sismi di elevata intensità. Accelerazione di attivazione della Disgregazione: $a_D = 0.229 g$		
Azioni Fuori Piano	IQM_{FP}	4.50	B		1.05	C				
Azioni Nel Piano	IQM_{NP}	4.00	B		1.05	C				
Proprietà meccaniche (N/mm²)										
		IQM			IQM			NTC		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
Modulo di elasticità normale	E	1223	1479	1733	756	918	1079	1020	1230	1440
Modulo di elasticità tangenziale	G	376	453	530	247	298	348	340	410	480
Resistenza media a compressione	f_m	2.521	3.282	4.032	1.377	1.857	2.330	2.000	2.500	3.000
Resistenza media a taglio (irregolare)	τ_0	0.047	0.062	0.077	0.023	0.029	0.036	0.035	0.043	0.051
Resistenza media a taglio (regolare)	f_v0									

Fig. 27. IQM per la muratura a conci sbazzati del piano terra, considerando l'effetto del Jerk (Amatrice)

		Analisi Statica			Analisi Sismica					
Parametri della Regola dell'Arte										
		NR	PR	R	NR	PR	R	Valutazioni quantitative		
Presenza Diatoni	P.D.							<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato trasversale (cm)	110	
Malta Efficace	MA.							<input checked="" type="checkbox"/> Malta di pessima qualità		
Forma Elementi	F.EL.							<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato frontale (cm)	122	Paramento B 122
Sfalsamento Giunti	S.G.							<input type="checkbox"/> Dimensione massima degli elementi (cm)	30	
Resistenza Elementi	R.EL.									
Orizzontalità dei filari	OR.									
Dimensione degli elementi	D.EL.									
Indici di Qualità Muraria										
Azioni Verticali	IQM_V	2.50	B	1.40	C	$IQM_{FP} \leq 4 \rightarrow$ Possibile disgregazione muraria con sismi di elevata intensità. Accelerazione di attivazione della Disgregazione: $a_D = 0.229\text{ g}$				
Azioni Fuori Piano	IQM_{FP}	2.00	C	1.05	C					
Azioni Nel Piano	IQM_{NP}	2.50	C	1.05	C					
Proprietà meccaniche (N/mm²)										
		IQM			IQM			NTC		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
Modulo di elasticità normale	E	897	1087	1277	756	918	1079	1020	1230	1440
Modulo di elasticità tangenziale	G	303	366	428	247	298	348	340	410	480
Resistenza media a compressione	f_m	1.707	2.273	2.831	1.377	1.857	2.330	2.000	2.500	3.000
Resistenza media a taglio (irregolare)	τ_0	0.034	0.045	0.055	0.023	0.029	0.036	0.035	0.043	0.051
Resistenza media a taglio (regolare)	f_{v0}									

Fig. 28. IQM per la muratura a conci sbazzati di scarsa qualità presente ai piani primo e ultimo, considerando l'effetto del Jerk (Amatrice)

Poiché come osservato in precedenza il declassamento è limitato dai più bassi valori possibili di IQM_{FP} , si ha coincidenza con il sito ubicato a Fivizzano.

Per quanto riguarda la muratura a mattoni pieni, la Tab. III indica, in corrispondenza di $J_{VS}=48.20$ g/s, la perdita di due classi per il parametro MA e di una classe per entrambi i parametri PD e OR. La Fig. 29 riporta il calcolo di IQM per i mattoni pieni con il degrado dei tre parametri, che determina la discesa di IQM_{FP} da 4.20 a 2.20, sotto alla soglia di 4: confrontando con il sito di Fivizzano (Fig. 24), la discesa è più marcata (viene raggiunto il valore di 2.20 anziché 3.85) e i parametri meccanici subiscono un più deciso peggioramento.

La muratura a mattoni pieni, per effetto del Jerk, diviene soggetta a possibile disgregazione e nella verifica corrispondente si dovrà considerare un'accelerazione di attivazione $a_D = 0.315$ g, soglia nettamente inferiore rispetto a quella determinata per Fivizzano (0.439 g).

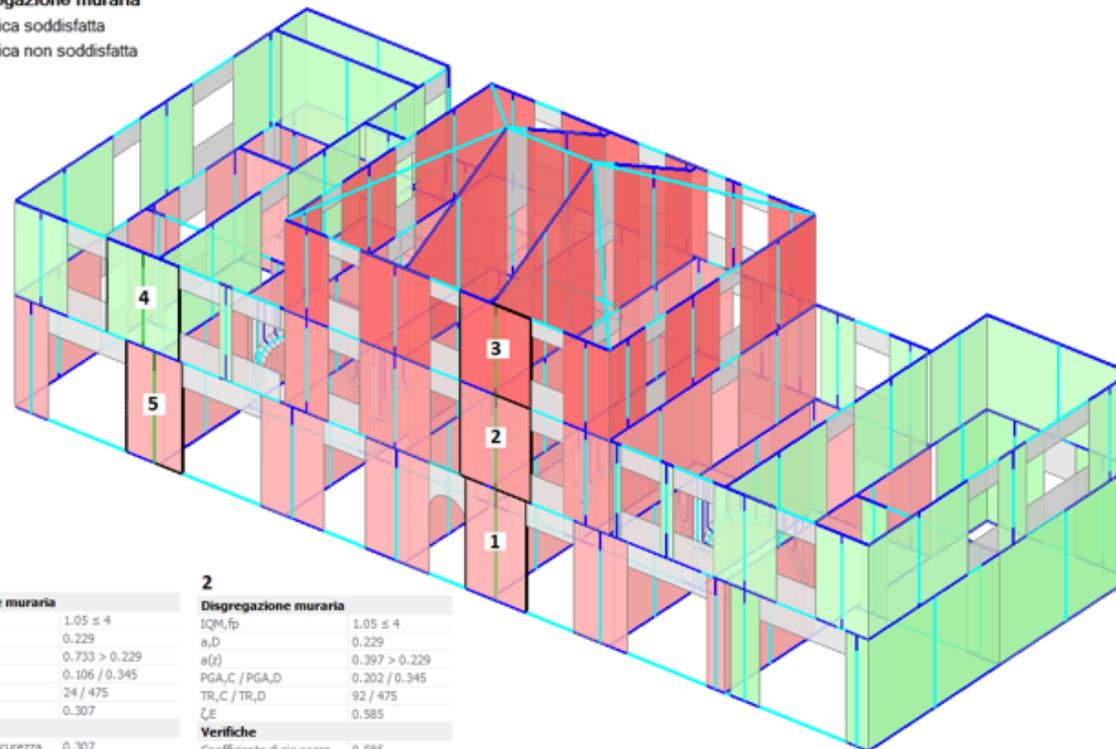
		Analisi Statica			Analisi Sismica					
Parametri della Regola dell'Arte										
Presenza Diatoni	P.D.	NR	PR	R	NR	PR	R	Valutazioni quantitative		
Malta Efficace	MA							<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato trasversale (cm)	100	
Foma Elementi	F.EL.							<input checked="" type="checkbox"/> Malta di pessima qualità		
Sfalsamento Giunti	S.G.							<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato frontale (cm)	100	Paramento B 100
Resistenza Elementi	R.EL.							<input type="checkbox"/> Dimensione massima degli elementi (cm)	25	
Orizzontalità dei filari	OR.									
Dimensione degli elementi	D.EL.									
Indici di Qualità Muraria										
Azioni Verticali	IQM_V	2.94	B		0.54	C		$IQM_{FP} < 4 \rightarrow$ Possibile disgregazione muraria con sismi di elevata intensità. Accelerazione di attivazione della Disgregazione: $a_D = 0.315$ g		
Azioni Fuori Piano	IQM_{FP}	4.20	B		2.20	C				
Azioni Nel Piano	IQM_{NP}	3.87	B		0.24	C				
Proprietà meccaniche (N/mm²)										
		IQM			IQM			NTC		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
Modulo di elasticità normale	E	960	1163	1366	662	804	946	960	1200	1440
Modulo di elasticità tangenziale	G	369	445	520	220	265	310	320	400	480
Resistenza media a compressione	f_m	1.860	2.464	3.060	1.164	1.585	2.001	1.820	2.415	3.010
Resistenza media a taglio (irregolare)	τ_0	0.046	0.061	0.075	0.017	0.022	0.027	0.035	0.063	0.091
Resistenza media a taglio (regolare)	f_{v0}	0.108	0.156	0.204	0.010	0.017	0.023	0.091	0.140	0.189

Fig. 29. IQM per la muratura di mattoni pieni con giunti di ampio spessore (> 13 mm) presente nella zona di ampliamento dell'edificio, considerando l'effetto del Jerk (Amatrice)

Seguendo un percorso analogo a quanto illustrato in precedenza, **si giunge al risultato della verifica di disgregazione mostrato in Fig. 30**. Tutte le pareti con muratura a conci sbazzati sono soggette a disgregazione, mentre le murature in mattoni pieni, pur soggette a possibile disgregazione, presentano, in linea di principio, verifica soddisfatta. **Si tratta tuttavia di un risultato teorico: nell'evento reale, la disgregazione di una parete sottostante implica il collasso anche della muratura su di essa impostata**. Pertanto, il risultato realistico è quello rappresentato in Fig. 31, da considerarsi rappresentativo del modello (A.4).

Verifica di disgregazione muraria

- $\zeta_E \geq 0.800$: Verifica soddisfatta
- $\zeta_E < 0.800$: Verifica non soddisfatta



3

Disgregazione muraria	
IQM,fp	1.05 ≤ 4
a ₁ D	0.229
a(z)	0.733 > 0.229
PGA,C / PGA,D	0.106 / 0.345
TR,C / TR,D	24 / 475
ζ _E	0.307
Verifiche	
Coefficiente di sicurezza	0.307
Verifica	Non soddisfatta

2

Disgregazione muraria	
IQM,fp	1.05 ≤ 4
a ₁ D	0.229
a(z)	0.397 > 0.229
PGA,C / PGA,D	0.202 / 0.345
TR,C / TR,D	92 / 475
ζ _E	0.585
Verifiche	
Coefficiente di sicurezza	0.585
Verifica	Non soddisfatta

1

Disgregazione muraria	
IQM,fp	1.05 ≤ 4
a ₁ D	0.229
a(z)	0.345 > 0.229
PGA,C / PGA,D	0.228 / 0.345
TR,C / TR,D	122 / 475
ζ _E	0.660
Verifiche	
Coefficiente di sicurezza	0.660
Verifica	Non soddisfatta

4★

Disgregazione muraria	
IQM,fp	2.20 ≤ 4
a ₁ D	0.315
a(z)	0.397 > 0.315
PGA,C / PGA,D	0.280 / 0.345
TR,C / TR,D	220 / 475
ζ _E	0.811
Verifiche	
Coefficiente di sicurezza	0.811
Verifica	Soddisfatta

5

Disgregazione muraria	
IQM,fp	1.05 ≤ 4
a ₁ D	0.229
a(z)	0.345 > 0.229
PGA,C / PGA,D	0.228 / 0.345
TR,C / TR,D	122 / 475
ζ _E	0.660
Verifiche	
Coefficiente di sicurezza	0.660
Verifica	Non soddisfatta

Fig. 30. Modello (A.4): verifica di disgregazione teorica considerando l'effetto del Jerk (Amatrice)

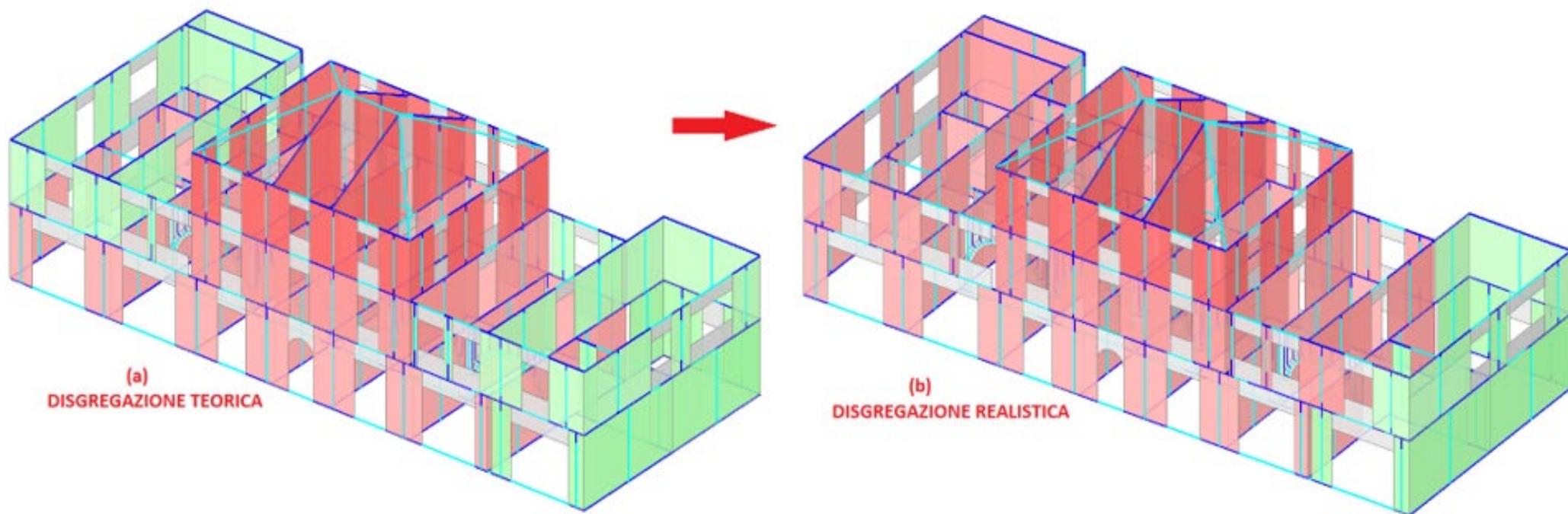


Fig. 31. Modello (A.4): verifica di disgregazione realistica considerando l'effetto del Jerk (Amatrice)

Confrontando risultati della verifica di disgregazione ottenuti considerando gli effetti del Jerk (Modello (A.4) in Fig. 31.(b)) con quelli del Modello (A.2) in Fig. 21 senza tali effetti, si osservano le seguenti variazioni:

- tutte le pareti, incluse quelle in mattoni pieni, mostrano in fase sismica una qualità muraria favorevole al meccanismo di disgregazione: non c'è più nessuna parete per la quale sia possibile escludere a priori tale comportamento;
- diversamente dal caso senza Jerk, tutte le pareti in conci sbozzati del piano terra hanno verifica di disgregazione non soddisfatta: la disgregazione si estende quindi a tutta l'elevazione dell'edificio e determina il coinvolgimento dell'ala di ampliamento dove al piano primo i mattoni pieni, di per sé teoricamente non disgregati, collassano per effetto della crisi delle murature sottostanti in conci sbozzati.

In Fig. 30 sono riportati in dettaglio i risultati della verifica per quattro pareti rappresentative: la n.3 dell'ultimo piano, con verifica non soddisfatta, la n.2 del piano primo, con verifica non soddisfatta, la n.1 del piano terra, con verifica non soddisfatta, la n.4 del piano primo (zona ampliamento) con verifica soddisfatta dal punto di vista teorico, ma anch'essa in crisi per effetto dei collassi sottostanti (vd. Fig. 31) e la n.5 del piano terra, con verifica non soddisfatta.

In Tab. VII sono riportati i risultati di tutte le analisi.

SLV: Disgregazione muraria	0.307
SLV: Cinematismo	0.478
SLV: Pushover	0.496

Tab. VII. Modello (A.4): sintesi dei risultati con gerarchia dei meccanismi considerando per la disgregazione l'effetto del Jerk (Amatrice)

In sintesi, gli effetti del Jerk sulla verifica di disgregazione sono rappresentati in Fig. 32: l'immagine evidenzia la maggior importanza dei meccanismi di disgregazione passando dal modello (A.2) al modello (A.4).

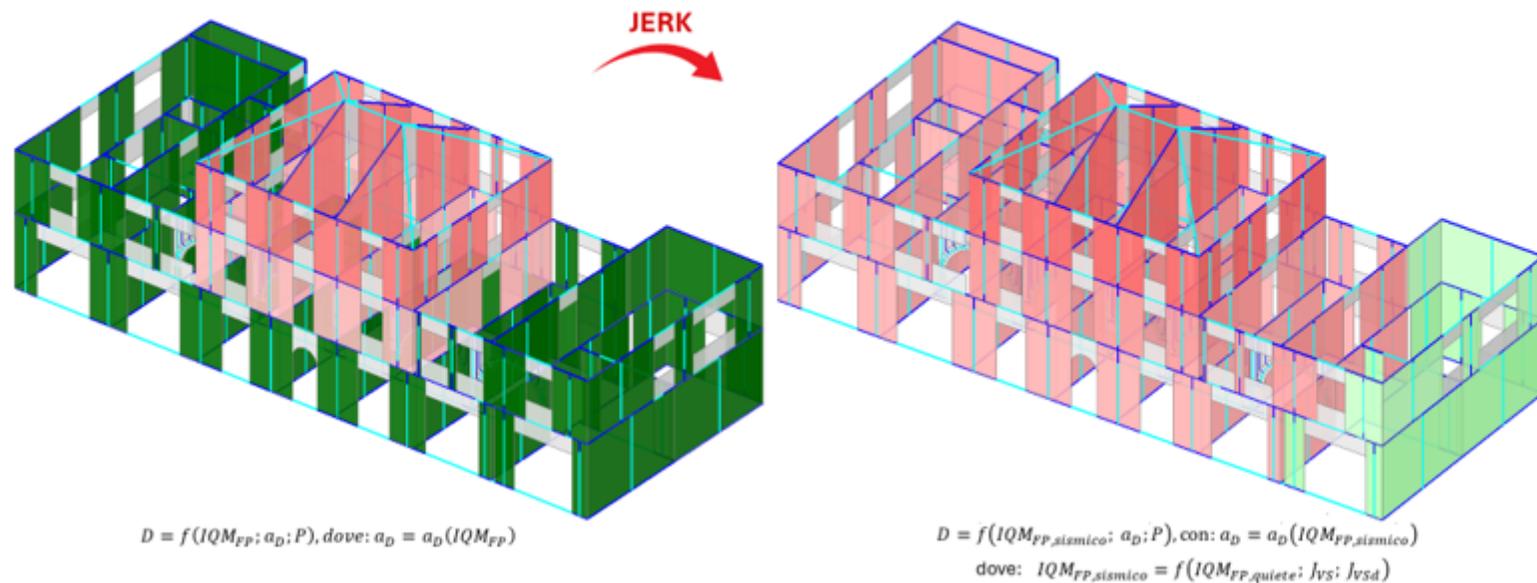


Fig. 32. Effetti del Jerk sulla possibile disgregazione nell'analisi di vulnerabilità dello stato di fatto per l'edificio di esempio posto ad Amatrice

La Tab. VII mostra che **la disgregazione muraria considerando l'effetto del Jerk abbate l'indicatore di rischio sismico da 0.478, ottenuto con l'analisi dei meccanismi di collasso, a 0.307** (anziché 0.414 ottenuto senza considerare il Jerk). **Il meccanismo di disgregazione con effetto del Jerk riduce l'indicatore di rischio sismico del 35.8% (anziché 13.4% ottenuto senza considerare il Jerk).**

Studiando l'edificio di esempio, posto a Fivizzano o ad Amatrice, si è dunque osservato che il meccanismo più sfavorevole è la disgregazione, che per effetto del Jerk coinvolge ampie porzioni dell'edificio, fino a determinare una crisi di fatto globale per il sito di Amatrice.

Per gli altri comportamenti strutturali (cinematismi, pushover) i corrispondenti risultati perdono significato fisico ma sono comunque importanti per evidenziare come, senza considerare la disgregazione, si possa sovrastimare in modo rilevante la capacità antisismica dell'edificio.

Completata la valutazione dello stato di fatto, **occorre individuare uno stato di progetto** che rispetti i requisiti richiesti:

- **intervento di miglioramento con incremento di indicatore di rischio sismico $\Delta Z_E \geq 0.10$;**
- **livello di sicurezza pari all'adeguamento nei confronti della disgregazione.**

La configurazione di progetto dovrà quindi ridurre la vulnerabilità contrastando il fenomeno della disgregazione e consentendo all'edificio lo sviluppo delle sue capacità come comportamento locale (cinematismi) e globale (pushover).

Nei confronti della disgregazione, sono possibili i seguenti approcci:

- (a) migliorare la qualità muraria, ad esempio rigenerando la malta all'interno della muratura e realizzando diatoni;
- (b) applicare interventi di consolidamento tali da annullare i possibili movimenti disgregativi, ad esempio ristilatura armata dei giunti o intonaci armati.

La qualità muraria definita attraverso l'indice IQM si riferisce allo stato di fatto delle murature, considerando le possibili varianti sulle prestazioni della malta, la presenza di diatoni, la connessione trasversale, la presenza di ricorsi. **Quando la muratura viene consolidata con iniezioni, intonaco armato o ristilatura armata, non vengono definiti corrispondenti valori dell'indice di qualità:** nei confronti del progetto di consolidamento, il ruolo svolto dal metodo IQM è quello di fornire i parametri meccanici di riferimento per la muratura allo stato di fatto, da amplificare in base al tipo di intervento secondo i coefficienti correttivi proposti dalla Normativa tecnica.

In generale, **i meccanismi di disgregazione vengono contrastati e annullati a priori da un corretto intervento di consolidamento esteso a tutte le pareti che allo stato di fatto sono soggette a possibile disgregazione:** l'insieme di tali pareti sarà stato definito considerando la loro qualità muratura originaria e l'effetto del Jerk, secondo la metodologia illustrata nel presente lavoro.

Il modello (A.5) viene ottenuto a partire dallo stato di fatto del modello (A.2) applicando come tecnica di consolidamento la **ristilatura armata**: considerando i risultati ottenuti dalla verifica di vulnerabilità (cfr. Fig. 32), **l'intervento viene esteso all'intero organismo resistente**. Per le tre tipologie murarie presenti nell'edificio, il miglioramento sui parametri meccanici ottenuto mediante i coefficienti correttivi suggeriti dalla Normativa [3] è riportato in Fig. 33.

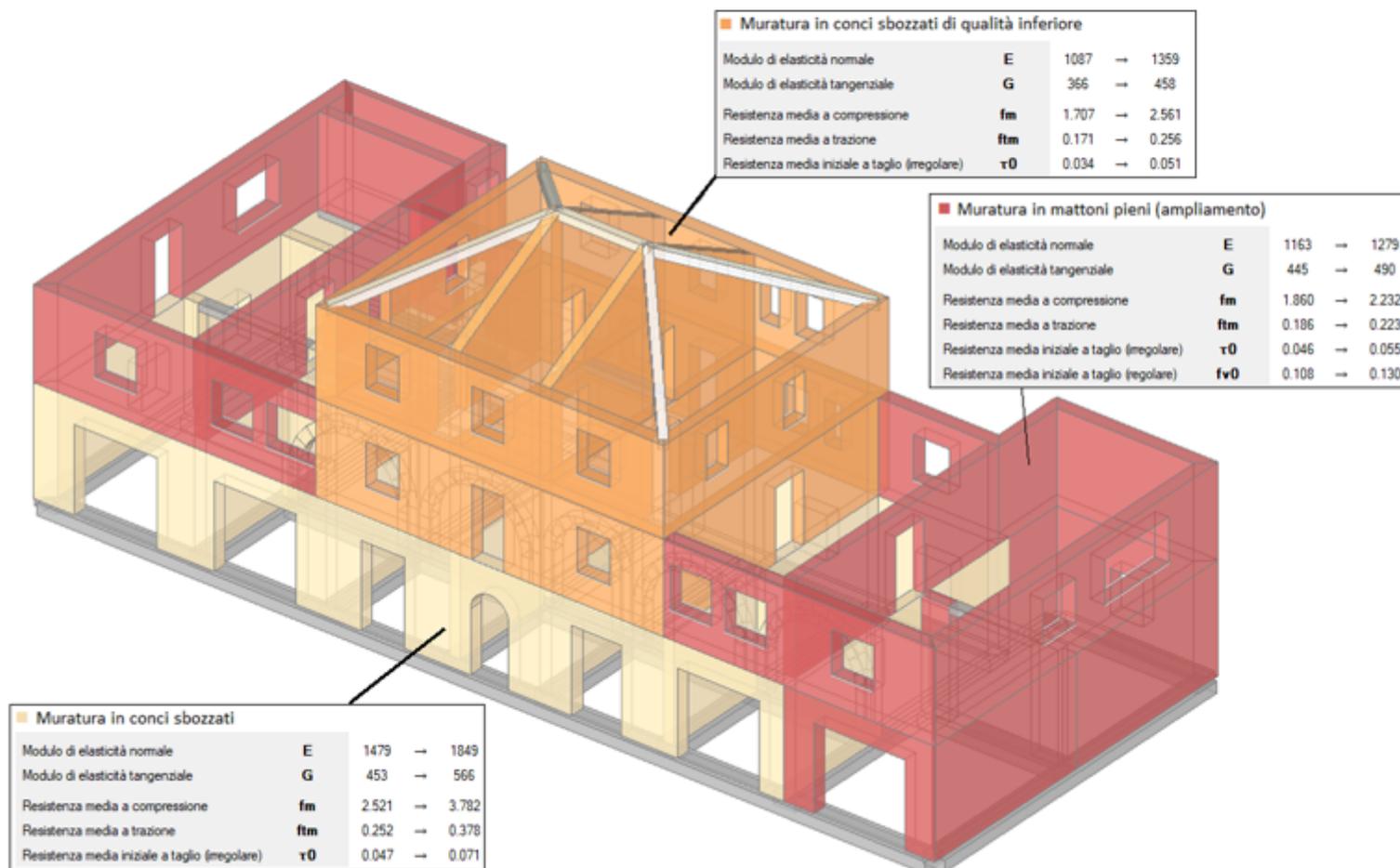


Fig. 33. Modello (A.5): intervento di consolidamento con ristilatura armata esteso a tutto l'edificio/

La Fig. 34 mostra la verifica di disgregazione implicitamente soddisfatta grazie all'intervento di consolidamento con ristilatura armata.

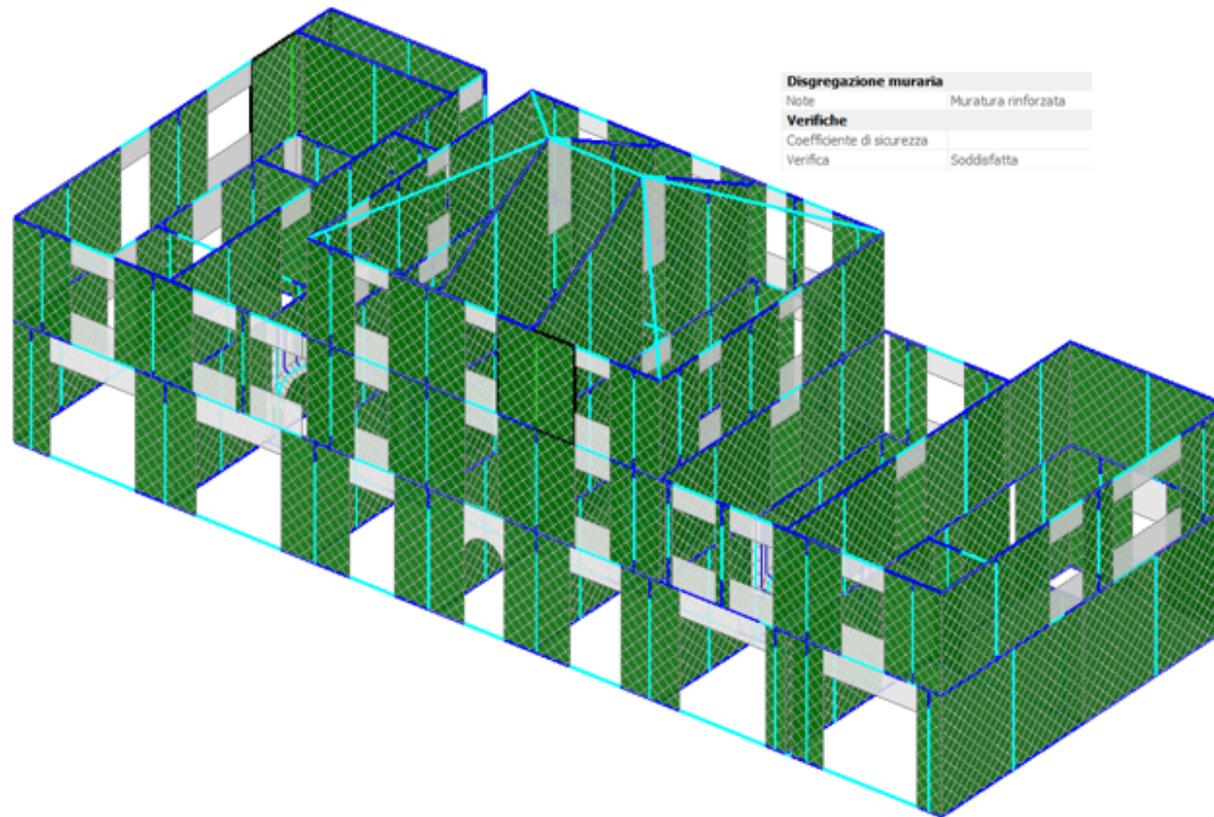


Fig. 34. Modello (A.5): verifica di disgregazione implicitamente soddisfatta

Eseguendo l'analisi completa, si ottengono i risultati mostrati in Tab. VIII.

SLV: Cinematismo	0.478
SLV: Pushover	0.733
SLV: Disgregazione muraria	>>1

Tab. VIII. Modello (A.5): sintesi dei risultati dell'analisi per lo stato di progetto (sito: Amatrice)

La verifica di sicurezza non dipende più dalla disgregazione; i comportamenti strutturali locali (meccanismi di collasso) e globale assumono significato fisico e forniscono risultati non più fittizi ma attendibili.

Si noti che il consolidamento nei confronti dei cinematismi non è stato sviluppato nell'esempio, poiché l'esecuzione di noti presidi di progetto (tiranti, collegamenti fra pareti e fra pareti e solai, eliminazione delle spinte in copertura) è in grado di incrementarne il corrispondente risultato fino a fargli superare il risultato della pushover: **una volta definito l'intervento anche nei confronti dei meccanismi locali, il risultato della pushover diviene l'indicatore di rischio sismico di progetto definitivo.**

Pertanto, lo stato di progetto rispetta i requisiti richiesti:

- nei confronti della disgregazione è stato conseguito l'adeguamento;
- l'incremento di indicatore di rischio sismico è superiore a 0.10: $\Delta z_E = 0.733 - 0.414 > 0.10$, passando da meccanismi disgregativi per lo stato di fatto ($z_E = 0.414$) al meccanismo globale resistente per lo stato di progetto ($z_E = 0.733$).

Volendo considerare l'incremento $\Delta z_E \geq 0.10$ come riferimento da adottare anche per ogni singolo comportamento, anche per la sola analisi pushover l'intervento proposto consegue tale requisito:

$$z_{E, \text{progetto, pushover}} = 0.733 > z_{E, \text{attuale, pushover}} = 0.626$$

mentre per i cinematismi gli interventi locali di progetto, dimensionati in modo tale che il corrispondente indicatore di rischio sia superiore a quello della pushover, garantiscono, rispetto al valore dello stato di fatto 0.478, l'incremento $\Delta z_E > 0.10$:

$$z_{E, \text{progetto, cinematismi}} \geq 0.733 > z_{E, \text{attuale, cinematismi}} = 0.478.$$

CONCLUSIONI

I danni strutturali su edifici in muratura provocati da azioni sismiche crescenti possono essere identificati mediante la **gerarchia dei meccanismi di collasso**, così organizzata:

- **disgregazione, tipica di murature di scarsa qualità**, come le murature del passato, in particolare dell'edilizia spontanea;
- **cinematismi di collasso** per ribaltamento di corpi rigidi;
- **collassi di tipo globale** collegati alle capacità di resistenza delle pareti.

E' stata illustrata l'**intima connessione fra qualità della muratura, disgregazione e contenuto ad alta frequenza dell'azione sismica (Jerk)**.

La tendenza alla disgregazione è una proprietà non solo intrinseca alla tipologia muraria, ma anche dipendente dalle vibrazioni verticali, che incidono sulle caratteristiche meccaniche dei leganti e tendono a dislocare gli elementi lapidei, instabilizzando le pareti e predisponendole all'azione espulsiva prodotta da elevate accelerazioni orizzontali.

Identificando la disgregazione in funzione della qualità muraria in quiete sismica e della variazione della qualità stessa per effetto del Jerk, è possibile condurre **analisi più realistiche** e stimare, nelle analisi di vulnerabilità degli stati di fatto, **corretti indicatori di rischio sismico**.

Laddove si prevede la possibile disgregazione, per effetto delle scarse proprietà meccaniche dei materiali e della percussione dovuta al Jerk, sotto l'azione di accelerazioni rilevanti, **l'intervento di consolidamento deve essere in grado di contrastare e annullare il fenomeno disgregativo, spostando la capacità dell'edificio verso il comportamento d'insieme**.

Rigenerazione delle malte, realizzazione di diatoni, ristilatura armata, intonaci armati:

sono approcci efficaci in tutti i casi in cui la qualità muraria risulti insufficiente, sia perché di per sé scarsa nello stato di quiete sismica, sia per qualità originaria mediocre peggiorata dal Jerk nel corso dell'evento sismico.

I tipi di intervento citati **rendono il Jerk influente, migliorano la qualità muraria e impediscono gli effetti distruttivi della disgregazione**: il percorso di prevenzione sismica, completato dalle valutazioni locali sui collegamenti strutturali, si attua in tal modo efficacemente anche nel caso di edifici in muratura di scarsa qualità sottoposti ad elevate sollecitazioni sismiche.

NOTE BIBLIOGRAFICHE

- Mariani M., Pugi F.: Accelerazione, Jerk e disgregazione muraria: effetti sismici sugli edifici esistenti in muratura, Ingenio, 2025:
<https://www.ingenio-web.it/articoli/accelerazione-jerk-e-disgregazione-muraria-effetti-sismici-sugli-edifici-esistenti-in-muratura/>
(edizione italiana di: Mariani M., Pugi F.: Acceleration, Jerk and Masonry Disaggregation. Seismic Effects on Existing Masonry Buildings, CompDyn 2025)
- Pugi F., Francioso A.: Effetti sismici e Disgregazione Muraria: una verifica fondamentale richiesta dalla Normativa, Ingenio, 2025:
<https://www.ingenio-web.it/articoli/effetti-sismici-e-disgregazione-muraria-una-verifica-fondamentale-richiesta-dalla-normativa/>
- Mariani M., Pugi F.: Impulsive actions due to seismic Jerk and design of reinforcements to counteract their effects in masonry buildings, CompDyn, 2023
- Mariani M., Pugi F.: Effects of impulsive actions due to seismic Jerk and local failures in masonry structures, CompDyn, 2020

- Mariani M., Pugi F., Francioso A.: Vertical component of the seismic action: amplified vulnerability of existing masonry buildings, CompDyn, 2019.
- Mariani M.: Terremoto e caos: un nuovo percorso di analisi del comportamento dei sismi, Ingenio, 2017:
<https://www.ingenio-web.it/articoli/terremoto-e-caos-un-nuovo-percorso-di-analisi-del-comportamento-dei-sismi/>
- M. Tong, G.-Q. Wang, G.C. Lee: Time derivative of earthquake acceleration, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol. 4, No. 1, pp.1-16, June, 2005
- Meyer, P., Ochsendorf, J., Germaine, J., and Kausel, E., 2007: The Impact of High-Frequency/Low-Energy Seismic Waves on Unreinforced Masonry, Earthquake Spectra, Vol. 23, No. 1, pp. 77–94
- Borri A. et al.: Manuale delle murature storiche, a cura di C. Donà, con la collaborazione di A. De Maria, DEI, Tipografia del Genio Civile, Roma, 2011.
- Borri A., De Maria A.: L'Indice di Qualità Muraria (IQM) e la disgregazione delle murature per effetto del sisma, Structural n. 229, maggio-giugno 2020.

- **Aedes.PCM, Aedes Software:**



L'esempio applicativo illustrato nel presente lavoro è stato svolto utilizzando **Aedes.PCM versione 2026***, che implementa le seguenti funzionalità: accelerazione soglia di disgregazione funzione di IQM fuori piano e gestione dell'eventuale declassamento sismico della qualità muraria per effetto del jerk

(* data di rilascio: gennaio 2026)

LIVE, 22 settembre 2025

Francesco Pugi*

**DISGREGAZIONE MURARIA
E ANALISI GLOBALI**

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

Grazie per l'attenzione!

La conferenza dell'Ing. Pugi sulla disgregazione muraria si compone di 2 parti:

1. Disgregazione muraria e interventi locali (*LIVE del 15 settembre 2025*)
2. Disgregazione muraria e analisi globali (*LIVE del 22 settembre 2025*)

entrambe disponibili in videoregistrazione su YouTube:

<https://www.aedes.it/web/guest/-/live-15-e-22-settembre-su-disgregazione-muraria>