



# Vulnerabilità sismica delle chiese in muratura: definizione di strategie di miglioramento sismico attraverso metodi semplificati

Valentina Corlito, Gianfranco De Matteis

Dipartimento di Architettura e Disegno Industriale – Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", Aversa (CE)

*Keywords: Chiese in muratura, vulnerabilità sismica, scala territoriale, analisi cinematica lineare, interventi*

## ABSTRACT

La conoscenza del livello di rischio sismico a cui è soggetto il patrimonio edilizio esistente rappresenta un problema fondamentale per la sua conservazione e per la sua fruizione in condizioni di sicurezza. Questo concetto assume uno spessore notevole in territori, come quello italiano, caratterizzati da una notevole pericolosità sismica. Gli scenari di danno osservati in Italia a seguito degli ultimi terremoti (Friuli, 1996; Umbria e Marche, 1998; Molise, 2002; L'Aquila, 2009; Emilia, 2012 ; Italia Centrale, 2016) hanno messo in luce l'effettiva vulnerabilità delle costruzioni storiche in muratura e la necessità di promuovere opportune strategie di prevenzione volte alla mitigazione del rischio sismico. La presente memoria propone una procedura semplificata, applicabile a larga scala su popolazioni omogenee di chiese, definita attraverso i dati raccolti nel territorio della Provincia de L'Aquila in seguito all'evento sismico del 2009. Tale procedura, basata sull'approccio cinematico lineare, è finalizzata all'identificazione di meccanismi cinematicamente ammissibili e alla verifica della capacità degli stessi in termini di accelerazioni resistenti. Per ogni cinematicismo individuato è stata quindi valutata l'efficacia strutturale di possibili interventi di miglioramento sismico in termini di variazione del rapporto tra domanda sismica e capacità strutturale.

## 1 INTRODUZIONE

Il patrimonio architettonico italiano comprende un gran numero di edifici storici in muratura di notevole valore, caratterizzati da evidenti differenze architettoniche e strutturali legate ai contesti storici e culturali in cui queste strutture furono concepite e realizzate. Nonostante le differenze, il terremoto rappresenta sempre la principale causa di danno e perdita di questo importante patrimonio.

Gli eventi sismici che si sono susseguiti in Italia negli ultimi anni (Friuli, 1996; Umbria e Marche, 1998; Molise, 2002; L'Aquila, 2009; Emilia, 2012 ; Italia Centrale, 2016) hanno sottolineato la necessità di definire adeguate procedure preventive finalizzate alla gestione del rischio sismico nell'intero territorio nazionale. Le indagini condotte in seguito a tali eventi hanno infatti evidenziato l'elevata fragilità degli edifici storici in muratura, ed in particolare, delle chiese, la cui vulnerabilità risulta generalmente amplificata dalla notevole complessità architettonica, tipologica e strutturale.

Quanto detto sottolinea come una migliore conoscenza del comportamento strutturale atteso e della vulnerabilità sismica delle chiese sia di fondamentale importanza per definire strategie preventive affidabili volte alla riduzione del rischio sismico su larga scala.

Diverse metodologie sono state sviluppate in letteratura, considerando approcci differenti, molti dei quali basati sulla definizione di scenari di danno forniti in termini di matrici di probabilità di danno o di curve di fragilità (Lagomarsino e Podestà, 2004; De Matteis et al., 2016; Hofer et al., 2018).

Molte sono comunque le metodologie alternative basate sullo studio del comportamento per macroelementi, attraverso analisi cinematiche lineari e non lineari (Griffith et al, 2003; De Matteis e Mazzolani, 2010; D'Ayala, 2005), o sulla definizione di specifici modelli numerici (Lourenço, 2005; Milani e Valente, 2015).

La presente memoria propone in particolare un metodo speditivo da applicare a larga scala su popolazioni omogenee di chiese, basato sull'applicazione dell'approccio cinematico lineare, finalizzato all'identificazione dei meccanismi cinematicamente ammissibili, alla verifica di sicurezza degli stessi e alla valutazione

dell'efficacia strutturale di possibili interventi, ritenuti compatibili ed efficaci.

## 2 STATO DELL'ARTE

### 2.1 *Il metodo predittivo*

Gli studi fin qui condotti dal gruppo di ricerca nel campo della valutazione del rischio sismico dei beni culturali, con particolare riferimento alla vulnerabilità sismica delle chiese in muratura, hanno consentito di validare un modello predittivo affidabile, finalizzato alla valutazione probabilistica degli scenari di danno potenzialmente indotti da terremoti di varia intensità su popolazioni omogenee di chiese (De Matteis et al 2016, 2019).

Tale modello è stato opportunamente calibrato sulla base delle osservazioni degli effetti indotti dal terremoto de L'Aquila del 2009 sulle chiese a tre navate delle diocesi di Sulmona-Valva [SU-VA] e L'Aquila [AQ].

Il metodo predittivo è stato applicato attraverso la definizione di un indice di vulnerabilità sismica  $i_v$ , ottenuto mediante un'opportuna combinazione dei punteggi assegnati agli elementi di fragilità e ai presidi antisismici individuati.

Il valore medio della vulnerabilità sismica definito per l'intera popolazione di chiese analizzate è stato quindi utilizzato per definire la distribuzione del livello di danno per terremoti di differente intensità  $I_{MCS}$ , consentendo di tracciare le curve di fragilità, definite come probabilità di superamento di un certo livello di danno, in funzione di una specifica intensità macrosismica ( $0 \leq I_{MCS} \leq 12$ ).

Per una descrizione completa del metodo si rimanda a De Matteis et al. (2019).

### 2.2 *La scheda MACHRO*

La metodologia è stata applicata a scala territoriale attraverso la compilazione della scheda MACHRO (Masonry CHurches Reconnaissance Operational form), uno strumento automatico messo a punto dal gruppo di ricerca (De Matteis et al., 2017), finalizzato al riconoscimento delle caratteristiche tipologiche e strutturali delle chiese analizzate e alla valutazione immediata della vulnerabilità sismica delle stesse. L'analisi è stata condotta con riferimento alla metodologia proposta dalle Linee Guida dei Beni Culturali (2011).

La compilazione della scheda per la popolazione di in esame ha consentito il raggiungimento dei seguenti obiettivi:

1. catalogazione territoriale della popolazione di chiese finalizzata ad una valutazione della vulnerabilità sismica su scala territoriale;
2. identificazione e valutazione della frequenza di indicatori di fragilità e presidi antisismici;
3. definizione di criteri attendibili finalizzati ad identificare parametri di vulnerabilità.
4. valutazione territoriale degli scenari di danno potenzialmente indotti da un evento sismico di una definita intensità  $I_{[MCS]}$ .

## 3 ANALISI DEI MECCANISMI LOCALI DI CORPO RIGIDO

### 3.1 *Aspetti generali*

Un edificio esistente in muratura può essere considerato come un assemblaggio di elementi staticamente determinati, connessi tra loro mediante vincoli monolateri. La scarsa efficacia (o l'assenza) delle connessioni tra questi elementi è tale da compromettere il comportamento dell'intera struttura, rendendola particolarmente vulnerabile alle sollecitazioni indotte da un evento sismico.

Un simile discorso assume una particolare valenza per le chiese in muratura, nelle quali la complessità plano-altimetrica connessa alla configurazione tipologica e le stratificazioni storiche dovute al susseguirsi di fasi costruttive differenti implicano la presenza di notevoli sconessioni interne.

L'azione sismica evidenzia tali sconessioni e favorisce l'insorgere di comportamenti differenziati per le diverse componenti strutturali (differenti frequenze di vibrazione), provocando il danneggiamento o il collasso delle parti caratterizzate da maggiore fragilità.

In presenza di muratura di buona qualità, il danno si manifesta generalmente con la perdita di equilibrio di porzioni murarie assimilabili a corpi rigidi che possono sostenere spostamenti anche rilevanti prima del collasso.

Tale ipotesi è confermata dai collassi parziali osservati nelle chiese in muratura esistenti in seguito agli ultimi eventi sismici (Figura 1).

Queste osservazioni evidenziano come lo studio della risposta sismica globale possa risultare poco significativa per molte costruzioni storiche, per le quali risulta invece molto spesso



a)



b)

Figura 1. Collapsi e danni parziali osservati nelle chiese di a) San Biagio di Amiternum a L'Aquila; b) Santa Maria degli Angeli a Paganica (AQ).

più indicato il ricorso a modelli locali.

L'analisi dei meccanismi locali di corpo rigido (circolare n.7, 2019) considera ogni elemento strutturale composto da un certo numero di blocchi murari, considerati indeformabili, tra loro collegati attraverso vincoli interni e connessi al resto della costruzione attraverso vincoli esterni.

L'insieme di tali blocchi rigidi vincolati deve essere tale da costituire una catena cinematica ad un grado di libertà.

Le ipotesi tradizionalmente adottate nelle analisi locali di corpo rigido sono le seguenti:

1. resistenza della muratura a trazione nulla;
2. resistenza a compressione infinita;
3. assenza di scorrimento relativo tra i blocchi murari.

La verifica dei meccanismi locali è condotta attraverso i metodi dell'analisi limite con approccio cinematico, secondo la seguente articolazione:

1. individuazione dei meccanismi di collasso possibili;
2. definizione del valore del moltiplicatore orizzontale dei carichi  $\lambda$  che comporta l'attivazione del meccanismo specifico;
3. verifica di sicurezza attraverso il confronto tra domanda sismica e capacità strutturale.

La capacità strutturale è nello specifico valutata attraverso l'approccio cinematico lineare e non lineare, per valutare, rispettivamente, l'accelerazione di attivazione del cinematisimo e la capacità di spostamento ultimo dello stesso.

L'approccio cinematico non lineare consente in particolare di valutare il comportamento strutturale degli edifici in muratura in campo non lineare, analizzando la capacità di spostamento del meccanismo prima del raggiungimento del collasso e confrontando tali valori con la domanda di spostamento definita in termini spettrali, consentendo inoltre di analizzare il comportamento post-elastico di eventuali dispositivi presenti (Doherty et al. 2002; D'Ayala 2005; Casapulla and Argiento 2017).

Tali criteri sono estendibili agli edifici monumentali tramite il riconoscimento di elementi ad un grado di libertà (SDOF) che identificano le configurazioni cinematiche tipiche dei macroelementi.

Il presente articolo propone un metodo semplificato da applicare in via speditiva a larga scala su popolazioni omogenee di chiese, basato sull'implementazione della scheda MACHRO e sull'utilizzo dei dati di catalogazione territoriale raccolti in sede di valutazione della vulnerabilità sismica.

Tale metodo è finalizzato all'identificazione dei meccanismi cinematicamente ammissibili per le chiese analizzate e alla verifica della capacità degli stessi in termini di accelerazioni possibili e di definizione di indici di sicurezza. I risultati di tale studio, in termini statistici, sono stati quindi messi a confronto con le effettive percentuali di attivazione dei meccanismi osservati in seguito all'evento sismico del 2009, con riferimento al campione delle 38 chiese a tre navate della Diocesi [AQ] di Figura 2 maggiormente danneggiate dal sisma e precedentemente analizzate in De Matteis et al. (2019), facendo riferimento, per ragioni di brevità, al solo macroelemento facciata.



Figura 2. Inquadramento territoriale delle 38 chiese a tre navate della Diocesi dell'Aquila [AQ].

Per ogni cinematismo individuato è stata inoltre valutata l'efficacia strutturale di possibili interventi, ritenuti compatibili ed efficaci, in termini di inibizione del meccanismo analizzato e di variazione del rapporto tra domanda sismica e capacità strutturale.

### 3.2 Identificazione dei cinematismi possibili

In un approccio di tipo cinematico, il primo criterio da seguire nella suddivisione in blocchi rigidi è quello di un esame geometrico dei possibili elementi architettonici in cui scomporre il manufatto, tenendo conto della geometria della struttura e delle zone di discontinuità o non omogeneità.

L'analisi dei meccanismi locali per le chiese in muratura può essere condotta assumendo la logica dei macroelementi e dei meccanismi di collasso ad essi riconducibili, individuati dalle Linee Guida dei Beni Culturali italiane (2011) sulla base degli studi statistici condotti in Italia in seguito agli ultimi eventi sismici.

Tra i possibili meccanismi di danno individuabili, quelli più critici per tali strutture sono quelli fuori piano, dovuti ad un insufficiente ammorsamento tra gli elementi murari (meccanismi di I MODO). Tali meccanismi evidenziano la condizione di massima fragilità della struttura nei confronti dell'azione sismica.

Quando i blocchi murari sono invece opportunamente vincolati alla restante parte della struttura e sono trattenuti da particolari accorgimenti strutturali o mediante l'inserimento di presidi antisismici, i meccanismi di I MODO risultano impediti e l'azione sismica sollecitante viene ricondotta alle pareti ad esse ortogonali, con formazione di lesioni nel piano (II MODO di danno). La sicurezza di una parete sollecitata fuori piano è generalmente minore di quella nel piano, per la quale è possibile riscontrare maggiori valori del moltiplicatori di collasso  $\lambda$ .

Per questo motivo e per ragioni di brevità, in questa sede, si fa riferimento solo ai meccanismi di I MODO associati al macroelemento facciata, analizzati nel campione delle 38 chiese a tre navate della Diocesi [AQ].

In funzione delle condizioni al contorno, dell'ammorsamento tra le pareti ortogonali e della presenza o meno di elementi di contenimento o di spinta, i meccanismi innescati possono essere di natura diversa (Beolchini et al, 2005).

Per il macroelemento facciata è stato quindi individuato un numero specifico di meccanismi di collasso cinematicamente ammissibili, ciascuno definito da differenti posizioni delle cerniere cilindriche.

Ciascun meccanismo risulta profondamente influenzato dalle caratteristiche tipologiche del macroelemento in esame (Figura 3), oltre che dalle condizioni di vincolo, così come schematicamente riportato in Figura 4 e in Tabella 1.

La conformazione tipologica risulta particolarmente influente soprattutto nel caso del meccanismo di ribaltamento della sommità della facciata, per il quale è possibile individuare quattro conformazioni differenti.

Sulla scorta delle considerazioni effettuate, i meccanismi individuati sono i seguenti:

1. ribaltamento semplice di facciata monolitica [K1];
2. ribaltamento semplice di facciata a doppia cortina [K2];
3. ribaltamento composto della facciata [K3];
4. ribaltamento semplice della sommità della facciata [K4, K5, K6];
5. ribaltamento composto della sommità della facciata [K7];
6. flessione verticale monolitica [K8];
7. flessione verticale di facciata a doppia cortina [K9];
8. flessione orizzontale monolitica della sommità della facciata [K10];
9. flessione orizzontale della sommità di facciata a doppia cortina [K11].

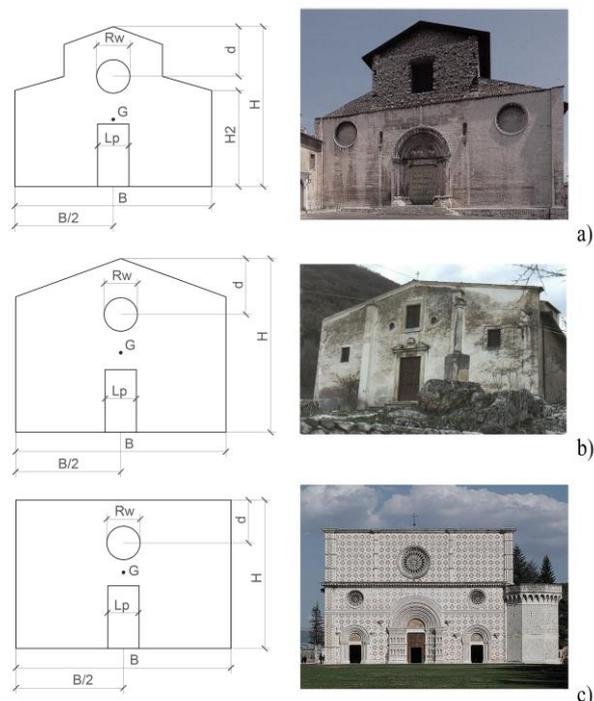


Figura 3. Schematizzazione delle tipologie di facciata individuabili nelle chiese a tre navate della Diocesi [AQ]; a) tipologia a salienti\_chiesa San Domenico a L'Aquila; b) tipologia a spioventi\_chiesa Sant'Agata a Tussillo (AQ); c) tipologia piana\_chiesa Santa Maria di Collemaggio a L'Aquila.

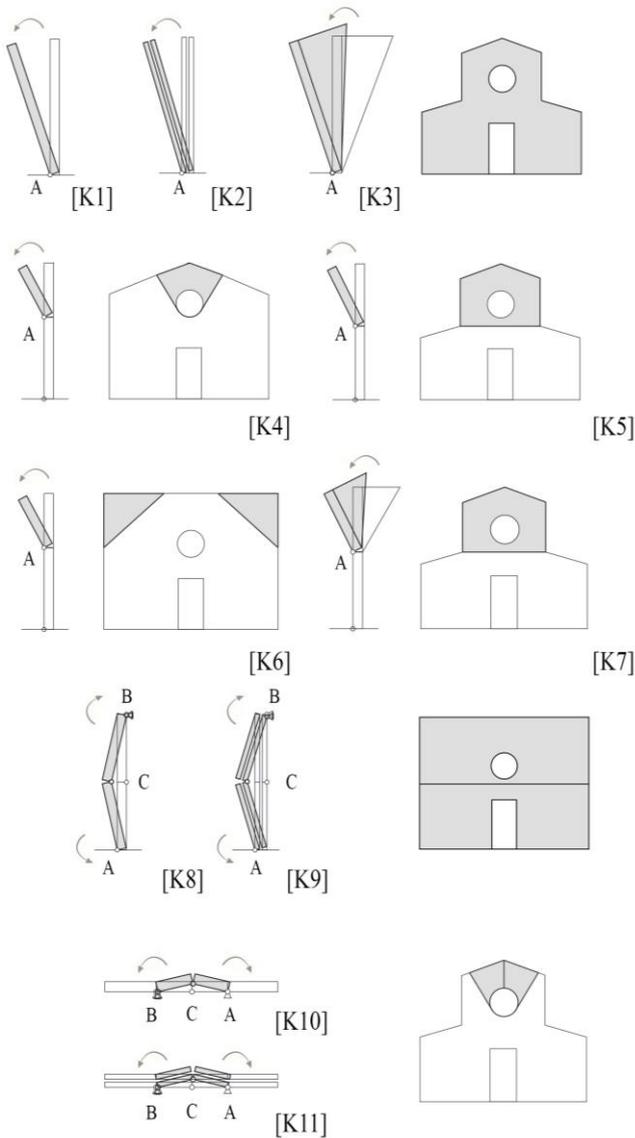


Figure 4. Meccanismi cinematicamente ammissibili per il macroelemento facciata.

### 3.3 Analisi cinematica lineare

Le analisi dei meccanismi di collasso sono state quindi sviluppate con l'analisi limite dell'equilibrio, secondo l'approccio cinematico lineare. Per ogni facciata e per ogni meccanismo individuato, il moltiplicatore orizzontale dei carichi  $\lambda$  è stato definito applicando il *Principio dei Lavori Virtuali*, in termini di spostamenti associati alla rotazione virtuale del generico blocco, uguagliando il lavoro totale eseguito dalle forze esterne al lavoro di eventuali forze interne al sistema.

L'accelerazione spettrale  $a^*_0$  che attiva tale cinematicismo è stata quindi calcolata secondo l'Equazione 2 (circolare n.7, 2019):

$$a^*_0 = \frac{\alpha \cdot g}{FC \cdot e^*} \quad (2)$$

dove  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $FC$  è il fattore

Tabella 1. Influenza delle caratteristiche tipologiche e delle condizioni di vincolo sui cinematicismi individuati.

Cinem.	Tipologia di facciata	Condizioni di vincolo
[K1]	- Salienti	- Assenza di elementi di contrasto
[K2]	- Piana	- Assenza di conn. in sommità
	- Spioventi	- Assenza di conn. con le pareti trasversali
[K3]	- Salienti	- Assenza di elementi di contrasto
	- Piana	- Assenza di vincoli in sommità
	- Spioventi	- Connessione. con le pareti trasversali
[K4]	- Salienti	- Assenza di vincoli in sommità
	- Piana	
	- Spioventi	
[K5]	- Salienti	- Assenza di vincoli in sommità
[K6]	- Piana	- Assenza di vincoli in sommità
[K7]	- Salienti	- Assenza di vincoli in sommità
		- Connessione. con le pareti trasversali
[K8]	- Salienti	- Connessioni in sommità
[K9]	- Piana	- Assenza di conn. con le pareti trasversali
	- Spioventi	
[K10]	- Salienti	- Assenza di conn. in sommità
[K11]	- Piana	- Connessioni con le pareti trasversali
	- Spioventi	

di confidenza legato al livello di conoscenza delle strutture investigate,  $e^*$  è la porzione di massa partecipante al meccanismo considerato.

Nel caso in esame, considerando la conoscenza limitata delle caratteristiche delle strutture, è stato assunto  $FC=1.35$  per LC1.

Per il generico meccanismo, la verifica di sicurezza allo SLV è stata considerata soddisfatta se l'accelerazione spettrale  $a^*_0$  che attiva il meccanismo soddisfa la seguente disuguaglianza (Equazione 3):

$$a^*_0 \geq \frac{a_g(P_{VR}) \cdot S}{q} \quad (3)$$

dove,  $a_g(P_{VR})$  è l'accelerazione sismica spettrale funzione della probabilità di superamento dello stato limite scelto e della vita di riferimento,  $S$  è un fattore funzione della categoria di sottosuolo e topografica,  $q$  è il fattore di struttura, assunto pari a 2 in assenza di valutazioni più accurate.

Nel caso di meccanismi di collasso connessi ad una porzione della struttura posta ad una certa

quota (come nel caso dei meccanismi associati alla sommità della facciata), è necessario tener conto dell'amplificazione rispetto alla quota del suolo. La verifica risulta in questo caso soddisfatta se l'accelerazione spettrale  $a^*_0$  soddisfa l'Equazione 4:

$$a^*_0 \geq \frac{S_e(T_1) \cdot \psi(Z) \cdot \gamma}{q} \quad (4)$$

dove  $S_e(T_1)$  è l'ordinata dello spettro elastico, funzione della probabilità di superamento dello stato limite scelto e del periodo di riferimento  $V_R$  per il periodo  $T_1$ ,  $\psi(Z)$  è il primo modo di vibrazione nella direzione considerata,  $Z$  è l'altezza del blocco considerato rispetto alla fondazione,  $\gamma$  è il coefficiente di partecipazione modale.

La valutazione sismica è stata quindi basata sulla definizione di un indice di sicurezza  $I_S$ , ottenuto come rapporto  $C/D$  tra la capacità sismica della struttura (con  $C=a^*_0 \cdot q$ ) e la domanda sismica  $D$  funzione dello stato limite di riferimento (con  $D=a_g(P_{VR}) \cdot S$ , in caso di meccanismi al livello della fondazione;  $D=Se(T_1) \cdot \psi(Z) \cdot \gamma$ , in caso di meccanismi posti alla quota  $Z$ ).

### 3.4 Risultati dell'analisi cinematica lineare

La lettura in chiave statistica dei risultati dell'analisi cinematica lineare, applicata al campione di chiese aquilane in esame e riferita ai meccanismi di I MODO del macroelemento facciata, è riportata in Figura 5. Nel grafico sono in particolare indicate:

1. la frequenza dei meccanismi di collasso resi cinematicamente possibili dalle condizioni di vincolo della struttura (*Cinematismi possibili*);
2. la frequenza (valutata rispetto all'intero campione) dei meccanismi per i quali non risulta soddisfatta la verifica di sicurezza in termini di rapporto  $C/D$  e per i quali l'indice di sicurezza  $I_S$  risulta essere minore di 1 (*Cinematismi attivabili [PGA (SLV)]*);
3. la frequenza (valutata rispetto all'intero campione) dei meccanismi potenzialmente attivabili dai valori della PGA associabili all'evento sismico aquilano del 6 Aprile 2009, definiti con riferimento alla legge di attenuazione di Sabetta e Pugliese (1987); per le frequenze in esame, i valori delle PGA risultano mediamente maggiori del 54% rispetto ai valori di attivazione dei mecca-

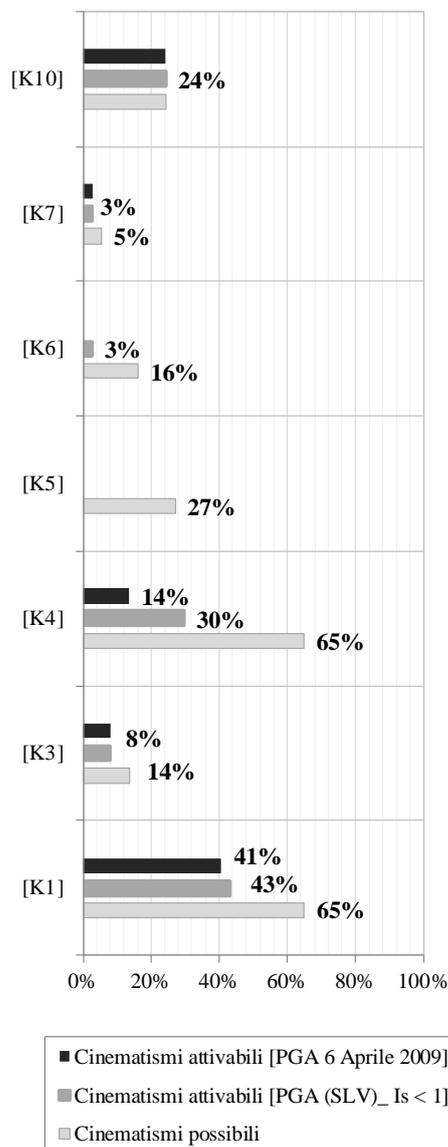


Figura 5. Frequenze dei cinematismi possibili e attivabili per le facciate del campione di chiese analizzato.

nismi considerati e mediamente inferiori dell'11% rispetto ai valori della PGA (SLV) attesa nei siti di riferimento.

La lettura dei risultati consente di escludere i cinematismi non attivabili (per le condizioni di vincolo rilevate o per le caratteristiche costruttive delle facciate) e di identificare le tipologie di cinematismi possibili, evidenziando quelli caratterizzati da una maggiore probabilità di attivazione. Per tali cinematismi, la valutazione della sicurezza è affidata al confronto tra le accelerazioni di attivazione dei meccanismi e le accelerazioni attese (verifica SLV) o registrate nei siti di riferimento.

I risultati evidenziano in particolare una elevata vulnerabilità del macroelemento facciata nei confronti dei cinematismi [K1] (ribaltamento semplice di facciata monolitica), [K4] (ribaltamento semplice della sommità della facciata) e [K10] (flessione orizzontale

monolitica della sommità), per i quali la verifica di sicurezza allo SLV non risulta soddisfatta, rispettivamente, nel 43%, 30% e 24% dei casi.

I risultati dell'analisi cinematica lineare sono stati quindi confrontati con le frequenze dei livelli di Danno  $D_k$  (con  $0 \leq D_k \leq 5$ ; Grunthal, 1998) per i meccanismi fuori piano della facciata [M1] e della sommità della stessa [M2], registrate nel campione in esame in seguito al sisma aquilano del 2009 (Tabella 2). L'attivazione dei meccanismi di danno [M1] e [M2] è stata considerata effettiva per  $D_k > 1$ , escludendo il livello  $D_k = 1$ , per il quale è possibile riscontrare errori di valutazione connessi all'ambigua classificazione del danno come sismico o progressivo.

Tabella 2. Frequenze dei livelli di danno  $D_k$  registrati in seguito al terremoto de L'Aquila 2009 per i meccanismi [M1] e [M2] associati al macroelemento facciata.

Livello di danno	[M1]	[M2]
	%	%
D0	22%	30%
D1	35%	32%
D2	16%	14%
D3	14%	3%
D4	11%	5%
D5	3%	16%

Il confronto tra i dati di Figura 4 con quelli riportati in Tabella 2, sintetizzato in Tabella 3, dimostra come, per tutti i cinematismi riconducibili all'intera facciata [K1, K3] (da confrontarsi con M1) e per tutti quelli relativa alla sommità della stessa [K4, K5, K6, K7, K10] (da confrontarsi con M2) la frequenza di potenziale attivazione sia sempre maggiore, sebbene di poco, rispetto alle attivazioni effettivamente registrate in seguito all'evento sismico.

La metodologia utilizzata si dimostra quindi leggermente prudentiale, poiché porta a sovrastimare il danno atteso e ad operare preventivamente a vantaggio di sicurezza.

Tabella 3. Confronto tra le frequenze di attivazione dei cinematismi [K1-10] dedotte dall'analisi cinematica lineare (PGA 6 Aprile 2009) e le frequenze dei livelli di danno  $D_k$  registrati in seguito al terremoto per i meccanismi [M1] e [M2].

	Meccanismi potenzialmente attivabili [%]	Meccanismi attivati (riscontro osservazionale, $D_k > 1$ ) [%]
[K1]	41%	[M1] 43%
[K3]	8%	
[K4]	14%	[M2] 38%
[K5]	0%	
[K6]	0%	
[K7]	3%	
[K10]	24%	

## 4 VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DEGLI INTERVENTI

### 4.1 Aspetti generali

L'approccio presentato, basato sull'identificazione dei meccanismi cinematicamente ammissibili per le chiese analizzate e sulla verifica della capacità degli stessi in termini di accelerazioni possibili, consente di eseguire un'analisi immediata delle vulnerabilità e delle carenze strutturali riscontrabili nella popolazione di edifici esaminata e di valutare, in maniera speditiva e preliminare, l'efficacia di possibili interventi di miglioramento sismico.

In questa logica operativa, il progetto di un intervento strutturale deve sempre discendere dall'analisi dei meccanismi di collasso potenzialmente attivabili dall'evento sismico atteso, dimostrando le carenze strutturali del macroelemento analizzato, il beneficio prodotto dall'intervento e l'assenza di effetti negativi connessi all'attivazione di ulteriori meccanismi di danno.

Il giudizio complessivo di un intervento eseguito su beni di valore storico-architettonico (quali le chiese in muratura) deve essere comunque sempre espresso in modo più generale, non solo valutando la variazione attesa in termini di incremento degli indici di sicurezza  $I_s$ , ma anche considerando aspetti di natura più qualitativa, connessi alla tutela e alla conservazione del bene architettonico.

### 4.2 Tipologie di intervento

Le tecniche di miglioramento sismico adottabili negli edifici in muratura esistenti sono molteplici e di differente natura (differente efficacia, compatibilità, invasività e convenienza economica).

In linea generale, per le chiese esistenti in muratura è possibile distinguere le seguenti tipologie di interventi (Linee Guida, 2011):

1. interventi volti a ridurre le carenze dei collegamenti;
2. interventi volti a ridurre le spinte di archi e volte;
3. interventi in copertura;
4. interventi volti ad incrementare la resistenza degli elementi murari;
5. interventi su pilastri e colonne;
6. interventi in fondazione.

Nel seguito è nello specifico riportato un elenco dei possibili interventi riferiti ai collegamenti, in genere considerati

particolarmente efficaci nell'inibizione dei meccanismi di danno di I MODO.

Tra gli interventi ritenuti compatibili, riconosciamo:

1. inserimento di catene metalliche (di tipo "attivo" o "passivo") nelle direzioni principali dell'edificio, ancorate alle murature mediante capochiave a paletta o a piastra; la scelta della sezione e del tipo di acciaio deve essere definita in sede di analisi;
2. ammorsatura tra pareti ortogonali; tale intervento si mostra particolarmente efficace in presenza di murature ben lavorate e di buona qualità;
3. inserimento di cordoli in sommità (in muratura armata o acciaio); tale intervento favorisce il collegamento delle murature ortogonali e consente di ripartire le sollecitazioni originate dall'evento sismico;
4. connessioni copertura-pareti (inseribili in modo puntuale); tra le soluzioni possibili, l'inserimento di brandelle chiodate o di capochiavi metallici in testa alle travi di copertura presenta una diffusione significativa.

Le tipologie di intervento considerate efficaci per l'inibizione dei cinematismi di I MODO individuati nel macroelemento facciata sono nello specifico riportati in Tabella 4.

Tabella 4. Tipologia di interventi possibili per i cinematismi individuati.

Cinem.	Interventi possibili
[K1]	- Inserimento di catene longitudinali
[K2]	- Ammorsatura facciata-pareti trasv. - Connessioni facciata-copertura
[K3]	- Inserimento di catene longitudinali - Connessioni facciata-copertura
[K4]	- Connessioni facciata-copertura
[K5]	- Inserimento di catene longitudinali - Ammorsatura facciata-pareti trasv. - Connessioni facciata-copertura
[K6]	- Connessioni facciata-copertura
[K7]	- Inserimento di catene longitudinali - Connessioni facciata-copertura
[K8]	- Inserimento di catene longitudinali
[K9]	- Ammorsatura facciata-pareti trasv.
[K10]	- Connessioni facciata-copertura
[K11]	

### 4.3 Valutazione dell'efficacia

L'efficacia degli interventi elencati, implementati nel campione delle 38 chiese a tre navate della Diocesi [AQ], è stata valutata mediante la procedura precedentemente proposta, basata sull'approccio cinematico lineare.

Lo studio è stato in particolare riferito ai cinematismi attivabili (per i quali la verifica di sicurezza non soddisfa lo SLV), valutando i benefici indotti dagli interventi stessi in termini di variazione dell'indice di sicurezza  $I_s$ .

Si considerano, a titolo esemplificativo della procedura utilizzata, i criteri connessi all'implementazione degli interventi possibili per il cinematismo [K1] (ribaltamento semplice di facciata monolitica). In questo caso, la realizzazione di ammorsamenti o di connessioni efficaci può comportare una completa inibizione (per variazione delle condizioni di vincolo) del cinematismo di ribaltamento. L'eventuale inserimento di catene longitudinali, invece, è opportunamente considerato nella condizione variata della catena cinematica. In particolare, il valore minimo della resistenza a trazione  $T$  dei tiranti (necessario a contrastare l'attivazione di [M1]) è calcolato definendo il valore minimo del moltiplicatore orizzontale dei carichi  $\lambda$ , imponendo la condizione limite di sicurezza  $I_s = 1$ . In tutti i casi, e per ogni cinematismo in esame, la variazione delle condizioni di vincolo è opportunamente considerata, valutando gli effetti connessi all'attivazione di ulteriori meccanismi di danno.

In Figura 6 sono riportati i valori dell'indice di sicurezza  $I_s$  calcolati per i cinematismi possibili nelle facciate delle 38 chiese aquilane prima dell'implementazione degli interventi strutturali.

In Figura 7 sono invece riportati i valori degli indici  $I_s$  calcolati in seguito all'implementazione degli interventi riportati in Tabella 4.

Il confronto tra i risultati evidenzia come in tutti i casi analizzati gli interventi producano un significativo incremento dell'indice di sicurezza, portando lo stesso almeno al valore minimo di norma. Nel loro insieme, i risultati ottenuti sottolineano come la progettazione preventiva di semplici interventi di miglioramento sismico possa avere un effetto immediato in termini di incremento della sicurezza e, quindi, di riduzione della vulnerabilità sismica delle strutture considerate.

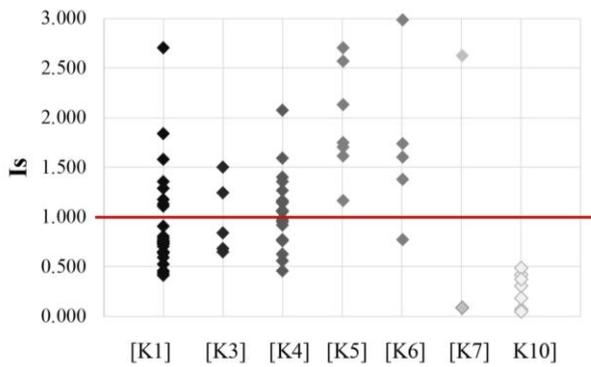


Figura 6. Indici di sicurezza  $I_s$  per i cinematismi possibili. Valori pre-intervento.

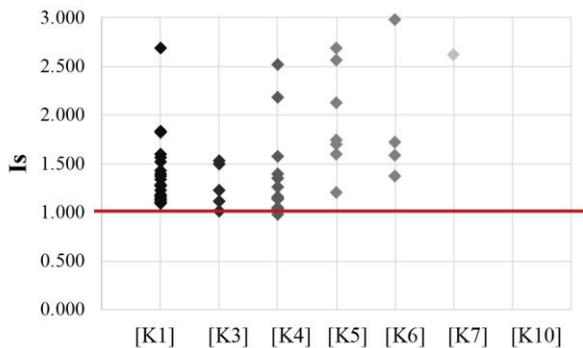


Figura 7. Indici di sicurezza  $I_s$  per i cinematismi possibili. Valori post-intervento.

## 5 CONCLUSIONI

Lo studio esposto nella seguente memoria consente di delineare le seguenti principali conclusioni:

1. l'utilizzo della scheda MACHRO, quale strumento automatico finalizzato alla valutazione speditiva della vulnerabilità sismica delle chiese in muratura, consente di catalogare popolazioni omogenee di chiese a livello territoriale e di collezionare un'ampia gamma di dati relativi alle caratteristiche tipologico-strutturali della popolazione stessa;
2. tali dati possono essere facilmente utilizzati per l'implementazione di procedure analitiche speditive da applicare a larga scala su popolazioni omogenee di chiese, finalizzate alla valutazione della sicurezza delle strutture e dell'efficacia strutturale di possibili interventi di miglioramento sismico proposti;
3. l'analisi dei meccanismi locali di corpo rigido mediante analisi cinematica lineare, applicata ai macroelementi generalmente

identificabili nelle chiese, consente di identificare i meccanismi cinematicamente ammissibili e di operare verifiche di sicurezza;

4. il confronto dei risultati ottenuti in via preliminare con le effettive percentuali di attivazione dei meccanismi osservati in seguito all'evento sismico del 2009 dimostra come la metodologia proposta risulti conservativa poiché in nessun caso la frequenza di attivazione potenziale risulta minore rispetto a quella effettivamente registrata in seguito all'evento sismico considerato;
5. l'approccio presentato, basato sull'identificazione dei meccanismi cinematicamente ammissibili per le chiese analizzate e sulla verifica della capacità degli stessi in termini di accelerazioni resistenti, consente di eseguire un'analisi immediata delle vulnerabilità e delle carenze strutturali riscontrabili negli edifici esaminati e di valutare, in maniera speditiva e preliminare, l'efficacia di possibili interventi di miglioramento sismico.

## RINGRAZIAMENTI

Il presente studio è stato sviluppato nell'ambito del Progetto Esecutivo Convenzione DPC/ReLUIS 2019-2021, WP4 - MAPPE di Rischio e scenari di danno Sismico (MARS).

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Beolchini, G. C., Milano, L., Antonacci, E. (a cura di), 2005. Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura – Definizione di modelli per l'analisi strutturale degli edifici in muratura, Volume II – Parte 1a. Convenzione di Ricerca con la Regione Marche; Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per la Tecnologia delle Costruzioni – Sede di L'Aquila; Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, delle Acque e del Terreno (DISAT) – Università degli Studi di L'Aquila.
- Casapulla, C., Argiento, L., 2017. Non-linear kinematic analysis of masonry walls out-of-plane loaded. The comparative role of friction between walls. *COMPdyn 2017, 6<sup>th</sup> ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. June 15–17, Rhodes Island, Greece. 10.7712/120117.5568.18332.
- Circolare del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 21 gennaio 2019, n. 7 del Consiglio superiore dei Lavori Pubblici recante "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le co-

- struzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”.
- De Matteis, G., Mazzolani, F.M., 2010. The Fossanova church: seismic vulnerability assessment by numerical and physical testing”. *International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 4-3, 222-245. 10.1080/15583050903078903.
- De Matteis, G., Criber, E., Brando, G., 2016. Damage Probability Matrices for Three-Nave Masonry Churches in Abruzzi After the 2009 L’Aquila Earthquake. *International Journal of Architectural Heritage*, **10**, 2-3, 120-145. 10.1080/15583058.2015.1113340.
- De Matteis, G., Brando, G., Cianchino, G., Corlito, V., Criber, E., 2017. La scheda MaChro: un nuovo strumento automatizzato per la ricognizione delle chiese finalizzato alla valutazione speditiva della vulnerabilità sismica. *Atti del XVII convegno ANIDIS L’ingegneria sismica in Italia*. ISBN:978-886741-8541.
- De Matteis, G., Brando, G., Corlito, V., 2019. Predictive model for seismic vulnerability assessment of churches based on the 2009 L’Aquila earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-28. 10.1007/s10518-019-00656-7.
- Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9 febbraio 2011, Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008, pubblicata in G.U. n. 47 del 26/2/2011 S.O. n. 54.
- Doherty, K., Griffith, M.C., Lam, N., Wilson, J., 2002. Displacement-based seismic analysis for out-of-plane bending of unreinforced masonry walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **31**, 833 - 850. 10.1002/eqe.126.
- D’Ayala, D., 2005. Force and Displacement Based Vulnerability Assessment for Traditional Buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **3**, 235-265. 10.1007/s10518-005-1239-x.
- Griffith, M., Magenes, G., Melis, G., Picchi, L., 2003. Evaluation of out-of-plane stability of unreinforced masonry walls subjected to seismic excitation. *Journal of Earthquake Engineering*, **7**, 141-169. 10.1080/13632460309350476.
- Grunthal, G. European Macroseismic Scale. Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg 1998; Vol. 15.
- Hofer, L., Zampieri, P., Zanini, M. A., Faleschini, F., Pellegrino, C., 2018. Seismic damage survey and empirical fragility curves for churches after the August 24, 2016 Central Italy earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **111**, 98-109. 10.1016/j.soildyn.2018.02.013.
- Lagomarsino, S., Podestà S., 2004. Seismic Vulnerability of Ancient Churches: II. Statistical Analysis of Surveyed Data and Methods for Risk Analysis. *Earthquake Spectra*, **20**-2, 395–412. 10.1193/1.1737736.
- Lourenco, P., 2005. Assessment, diagnosis and strengthening of Outeiro Church, Portugal. *Construction and Building Materials*, **19**, 634-645. 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.010.
- Milani, G., Valente, M., 2015. Comparative pushover and limit analyses on seven masonry churches damaged by the 2012 Emilia-Romagna (Italy) seismic events: Possibilities of non-linear finite elements compared with pre-assigned failure mechanisms. *Engineering Failure Analysis*, **47**, Part A, 129-161, ISSN 1350-6307. 10.1016/j.engfailanal.2014.09.016.
- Sabetta, F., Pugliese, A., 1987. Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from Italian strong-motion records. *Bull Seis. Soc. Am.*, **77**, 1491-1513.