



# Metodologie speditive per la valutazione della vulnerabilità sismica di chiese in muratura ad una navata: analisi preliminare di sensitività

Gianfranco De Matteis, Mattia Zizi

Dipartimento di Architettura e Design Industriale, Università della Campania "Luigi Vanvitelli", Abbazia di San Lorenzo, 81031 Aversa, Italia

*Keywords: Patrimonio culturale, Chiese esistenti, Muratura, Vulnerabilità sismica, Mappe di rischio*

## ABSTRACT

L'esigenza di proteggere e conservare il ricco e vastissimo patrimonio culturale presente nel territorio Italiano, attesa anche la pericolosità sismica da cui esso è interessato, pone in chiara evidenza la necessità di implementazione di metodologie di valutazione del rischio a larga scala. Nell'ultimo ventennio il mondo della ricerca si è interessato all'implementazione di modelli predittivi del danno, calibrati sulla scorta degli effetti osservati dopo i più importanti eventi sismici occorsi in Italia. Considerata l'ormai comprovata attendibilità di tali modelli, la presente memoria si pone l'obiettivo di porre le basi per la proposta di metodologie di valutazione della vulnerabilità sismica delle chiese in muratura, con lo scopo di favorirne l'utilizzo a larga scala. In particolare, sulla scorta della rielaborazione di dati raccolti durante le ispezioni post-terremoto condotte dopo le sequenze sismiche che hanno interessato l'Italia Centrale nel 2016-2017, vengono fornite le risultanze preliminari ottenute da un'analisi di sensitività finalizzata all'individuazione dei parametri qualitativi che incidono maggiormente sulla vulnerabilità sismica delle chiese in muratura ad una navata.

## 1 INTRODUZIONE

Il presente studio si colloca in un contesto più ampio di sviluppo di metodologie per la protezione sismica del patrimonio culturale esistente ed in particolare delle chiese in muratura.

A seguito dei recenti eventi sismici occorsi in Italia nell'arco dell'ultimo quarto di secolo (Umbria 1997, Molise 2002, L'Aquila 2009, Emilia 2012, Centro-Italia 2016-17), secondo una stima qualitativa, sono risultate danneggiate circa 10.000 chiese in muratura.

Già precedentemente al terremoto occorso in Umbria nel 1997, ovvero a partire dalla prima metà degli anni '80, il mondo della ricerca si era interessato allo studio di metodologie finalizzate alla valutazione a larga scala della vulnerabilità sismica degli edifici esistenti, calibrate sulla scorta dei danni osservati dopo l'evento dell'Irpinia 1980 (Braga et al. 1982, Benedetti e Pertini 1984). Sulla base di questi studi e in seguito alle importanti innovazioni apportate da Sandi e Floricel (1994) nel campo delle

valutazioni a larga scala, furono introdotti per la prima volta nel panorama nazionale metodi predittivi a scala territoriale per chiese in muratura risultate danneggiate dopo gli eventi del 1997 (Lagomarsino e Podestà 2004).

Tali metodi, la cui validità è ancor oggi riconosciuta, mettono in relazione il livello di danno medio, valutato utilizzando la scala EMS (Grünthal 1998), con parametri rappresentativi dell'intensità sismica e della vulnerabilità della chiesa, attraverso la definizione di curve di vulnerabilità, opportunamente calibrate sulla base di dati osservazionali.

In seguito a questo studio pionieristico, diverse attività di ricerca sono state condotte negli ultimi anni con riferimento a diversi eventi sismici, molte delle quali anche da parte degli autori di questa memoria, con il fine di operare confronti tra i metodi predittivi con i dati osservazionali e dunque validare tali modelli (Brandonisio et al. 2013, D'Amato et al. 2018, Hofer et al. 2018, Fuentes et al. 2019, De Matteis and Zizi 2019, De Matteis et al. 2019).

Ad oggi, una delle funzioni di vulnerabilità considerate più attendibili ai fini della predizione

del danno, risulta essere ancora quella proposta da Lagomarsino e Podestà (2004), con la quale è possibile stimare il danno medio atteso per un campione di chiese in funzione della loro vulnerabilità e dell'intensità sismica, in accordo all'Equazione (1):

$$\mu_D = 2.5 \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I + 3.4375 \cdot i_v + 8.9125}{3} \right) \right] \quad (0)$$

dove  $\mu_D$  rappresenta il danno medio atteso,  $I$  l'input sismico espresso in termini di intensità macrosismica (scala MCS) e  $i_v$  l'indice di vulnerabilità. L'andamento grafico della funzione iperbolica di Eq. (1) nel piano bidimensionale ( $I_{MCS}$ ,  $\mu_D$ ), per ciascun livello di vulnerabilità  $i_v$ , è rappresentato in Figura 1.

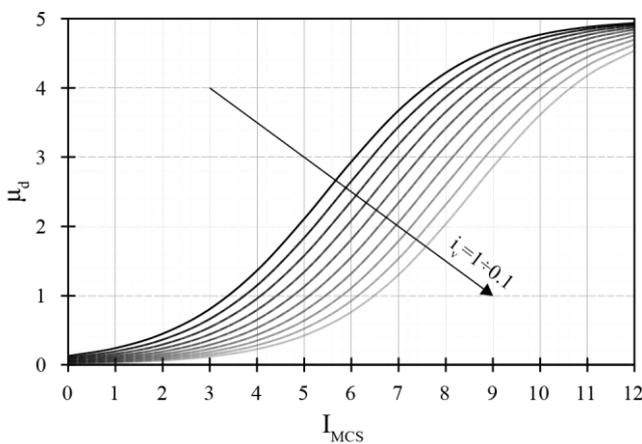


Figura 1. Funzioni di vulnerabilità per chiese in muratura

Tuttavia, ai fini dell'applicazione di tali modelli predittivi ad una scala maggiore, ad esempio nazionale, riuscire a valutare la vulnerabilità su un cospicuo numero di chiese, attesa anche la scarsità delle informazioni reperibili senza l'esecuzione di specifici sopralluoghi, è sicuramente una delle questioni di maggior dibattito, ma di non facile soluzione.

## 2 METODI DI VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA

### 2.1 Introduzione

Molti studi presenti in letteratura sono stati condotti con il fine di validare modelli più o meno accurati finalizzati alla valutazione della vulnerabilità di chiese in muratura (Lagomarsino 2006, Criber et al. 2015, Marotta et al. 2017, Despotaki et al. 2018, Palazzi et al. 2019). Secondo la classificazione proposta da Calvi et al. (2006), i modelli di valutazione della vulnerabilità di edifici esistenti, si raggruppano in tre macro-categorie, differenziate per tipo di approccio, per disponibilità di dati e quindi per

livello di accuratezza: metodi empirici, metodi ibridi e metodi analitici. Attesa la scala del contesto in cui si colloca il presente studio, sicuramente l'approccio empirico è quello più adatto ai fini preposti.

Tuttavia, va segnalato che attualmente la metodologia maggiormente diffusa è quella ibrida di primo livello, ad esempio proposta nelle Linee Guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale (G.U. 2011), ovvero basata sulla valutazione di indici di vulnerabilità (Benedetti and Pertini 1984, GNDT 1993).

### 2.2 L'approccio per macroelementi

La valutazione della vulnerabilità sismica di primo livello di chiese esistenti in muratura, così come del danno sismico, considerate le particolari complessità strutturali intrinseche da cui questa tipologia di edifici è caratterizzata, viene comunemente effettuata, secondo anche l'approccio proposto dalle Linee Guida dei Beni Culturali (G.U. 2011), seguendo la logica della suddivisione in macro-elementi. In particolare, secondo tale approccio, l'intera struttura della chiesa viene scomposta in 9 distinte sottostrutture, definite appunto macroelementi, a ciascuna delle quali sono collegati differenti meccanismi di danno (che nel caso di chiese in muratura risultano essere 28).

Secondo tale approccio, la vulnerabilità viene computata valutando, per ciascun meccanismo di danno, la presenza e l'efficacia di presidi antisismici, nonché la presenza e la gravità di indicatori di fragilità, (G.U. 2011).

Il comportamento sismico dell'intero manufatto è rappresentato dunque dall'indice di vulnerabilità  $i_v$ , valutato tenendo conto dell'importanza che ciascun meccanismo ha nel contesto dell'intera costruzione, in accordo con l'Equazione (2):

$$i_v = \frac{1}{6} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k \cdot (v_{k,i} - v_{k,p})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2} \quad (2)$$

dove  $\rho_k$  rappresenta il fattore di importanza, assegnato al meccanismo in base all'influenza che il meccanismo stesso ha sulla stabilità globale della struttura,  $v_{k,i}$  è il fattore legato alla presenza e alla gravità di indicatori di vulnerabilità rispetto al  $k$ -esimo meccanismo e  $v_{k,p}$  è il fattore legato alla presenza e all'efficienza di presidi antisismici rispetto al  $k$ -esimo meccanismo.

In Figura 2 è fornita la classificazione in macroelementi e meccanismi di danno e il fattore di importanza assegnato a ciascun meccanismo di danno, (Lagomarsino et al. 2004, De Matteis et al. 2016).

Fuori piano	Facciata principale	Facciata principale	Facciata principale
1 Ribaltamento della facciata $\rho_k=1$ 	2 Sommità della facciata $\rho_k=1$ 	3 Piano della facciata $\rho_k=0.5$ 	4 Protiro - Narcece $\rho_k=0.25$ 
Archi e volte	Muri laterali	Colonnato	Archi e volte
5 Risposta trasversale dell'aula $\rho_k=1$ 	6 Taglio nelle pareti longitudinali $\rho_k=1$ 	7 Risposta longitudinale del colonnato $\rho_k=1$ 	8 Volte della navata centrale $\rho_k=0.75$ 
Archi e volte	Fuori Piano	Muri laterali	Archi e volte
9 Volte delle navate laterali $\rho_k=0.75$ 	10 Ribaltamento pareti del transetto $\rho_k=0.75$ 	11 Taglio nelle pareti del transetto $\rho_k=0.5$ 	12 Volte del transetto $\rho_k=1$ 
Archi e volte	Cupola	Cupola	Fuori piano
13 Arco trionfale $\rho_k=1$ 	14 Cupola Tamburo / Tiburio $\rho_k=0.75$ 	15 Lanterna $\rho_k=0.25$ 	16 Ribaltamento dell'abside $\rho_k=0.75$ 
Muri laterali	Archi e volte	Copertura	Copertura
17 Taglio nel presbiterio o nell'abside $\rho_k=0.5$ 	18 Volte del presbiterio o dell'abside $\rho_k=0.75$ 	19 Meccanismi copertura aula $\rho_k=0.5$ 	20 Meccanismi copertura transetto $\rho_k=0.5$ 
Copertura	Cappelle	Cappelle	Archi e volte
21 Meccanismi copertura abside $\rho_k=0.5$ 	22 Ribaltamento delle cappelle $\rho_k=0.25$ 	23 Taglio nelle pareti delle cappelle $\rho_k=0.25$ 	24 Volte delle cappelle $\rho_k=0.5$ 
Muri laterali	Campanile	Campanile	Campanile
25 Irregolarità piano - altimetriche $\rho_k=1$ 	26 Aggetti $\rho_k=0.25$ 	27 Torre campanaria $\rho_k=1$ 	28 Cella campanaria $\rho_k=1$ 

Figura 2. Classificazione dei meccanismi di danno per edifici religiosi e rispettivo fattore di importanza  $\rho_k$

### 2.3 La scheda MaChro

Con il fine di ridurre le fonti di incertezza e di soggettività del giudizio e dunque di semplificare una procedura che, per quanto speditiva, richiede un'accurata valutazione della presenza e di presidi antisismici e di indicatori di fragilità, nonché rispettivamente della loro efficacia e della loro gravità, è stato precedentemente proposto uno strumento schedografico: la *scheda MaChro* (Masonry Churches Reconnaissance Operational Form) (De Matteis et al. 2017). Nella compilazione della *Scheda MaChro*, per ciascun edificio ecclesiastico analizzato, si è chiamati ad

identificare solo informazioni di base, le quali vengono rielaborate con il fine di fornire in output la misura della vulnerabilità come definita in Equazione (2).

### 2.4 Finalità e motivazioni dello studio

Il metodo canonico con approccio a macroelementi utilizzato per le valutazioni a larga scala tuttavia non si presta perfettamente ad un'applicazione a scala nazionale, soprattutto attese le scarse quantità e qualità di informazioni reperibili.

Sulla base di questa premessa, in un'ottica di definizione di metodologie per la conservazione e la protezione del patrimonio ecclesiastico esistente, in questa memoria viene presentato un preliminare studio di sensitività finalizzato all'individuazione di parametri (storici, tipologici e geometrici) maggiormente influenti sulla vulnerabilità sismica delle chiese in muratura ad una navata, ponendo le basi per la futura implementazione di metodi empirici utilizzabili a scala nazionale.

Tale valutazione preliminare è stata condotta sulla base di una rielaborazione di informazioni reperite durante le ispezioni condotte in seguito agli eventi sismici occorsi tra l'Agosto 2016 e il Gennaio 2017 nel Centro-Italia (sequenza Amatrice-Norcia-Visso).

## 3 IL CAMPIONE CONSIDERATO

### 3.1 Introduzione

Nell'ambito della "Attività ReLUIS Terremoto Centro Italia", effettuata sotto il coordinamento congiunto del Dipartimento della Protezione Civile e dell'allora Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo (MiBACT), dopo gli eventi tellurici del Centro Italia 2016-2017, gli autori di questa memoria hanno ispezionato circa 150 edifici monumentali rimasti coinvolti nello sciami sismico, inclusi palazzi storici, torri civiche e, maggiormente, chiese, con lo scopo di effettuare rilievi del danno e valutazioni speditive della sicurezza strutturale. In particolare, su un totale di 107 chiese ispezionate, 68 sono risultate essere caratterizzate da un impianto ad una navata e, con il fine di omogeneizzare il campione, nella presente memoria ci si è concentrati esclusivamente su tale tipologia.

Di seguito viene dunque fornita una descrizione qualitativa del campione, che, tuttavia, risulta più dettagliatamente riportata in De Matteis e Zizi (2019).

### 3.2 Distribuzione geografica del campione

Le 68 chiese che costituiscono il campione risultano essere dislocate in un territorio abbastanza ampio (Figura 3). In particolare, 22 chiese del campione sono site nel comune di Camerino (MC) nelle Marche, mentre altre 28 chiese appartengono a comuni marchigiani, con buona prevalenza di appartenenza alla provincia di Macerata. Le rimanenti 18 chiese sono site invece in provincia di Perugia (11 chiese) in Umbria e nella provincia di Rieti (7 chiese) nel Lazio.

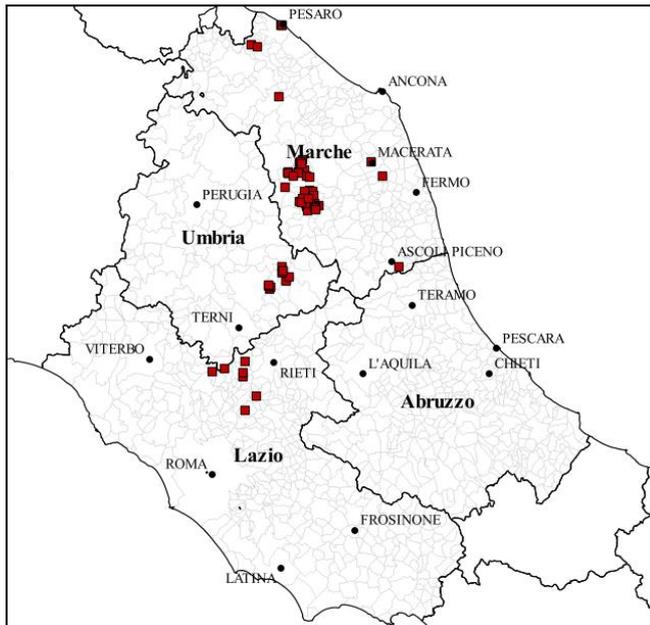


Figura 3. Geolocalizzazione del campione

### 3.3 Caratterizzazione del campione

Da un punto di vista storico, ovvero in relazione all'epoca di prima costruzione, le chiese considerate sono risultate essere abbastanza eterogenee. Infatti, sebbene quasi metà del campione (44%) sia costituito da chiese realizzate tra il XVII e il XVIII secolo, risultano egualmente presenti edifici religiosi realizzati nelle altre epoche, a partire dal XIII secolo in poi (Figura 4).

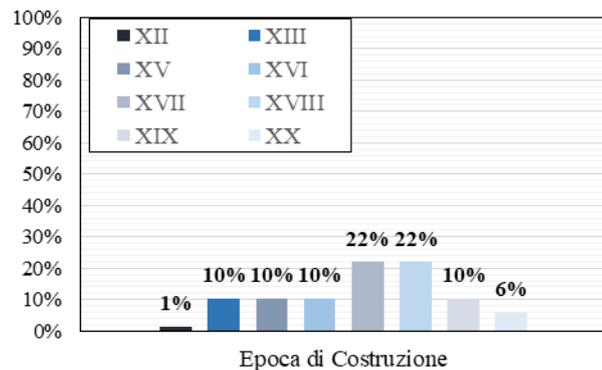


Figura 4. Caratterizzazione storica del campione: secolo di costruzione

Con riferimento, invece, alle caratteristiche tipologiche, è stata investigata anzitutto la tipologia di impianto, definendo 8 diverse possibili configurazioni, in funzione di presenza di cappelle laterali, abside e transetto. In particolare sono state definite:

- Tipologia 1: schema in pianta semplice ad aula unica;
- Tipologia 2: aula unica con cappelle laterali;
- Tipologia 3: aula unica con terminazione absidale;
- Tipologia 4: aula unica con transetto;
- Tipologia 5: aula unica con cappelle laterali e terminazione absidale;
- Tipologia 6: aula unica con cappelle laterali e transetto;
- Tipologia 7: aula unica con transetto e terminazione absidale;
- Tipologia 8: aula unica con transetto, cappelle laterali e terminazione absidale.

Il campione analizzato (Figura 5) presenta una netta prevalenza di chiese ad aula unica e terminazione absidale (43%) con una buona rappresentanza anche di chiese di Tipologia 1 e 5. Le altre tipologie invece sono risultate essere meno presenti e in particolare la Tipologia 6, ovvero quella con transetto e cappelle laterali, risulta essere completamente assente.

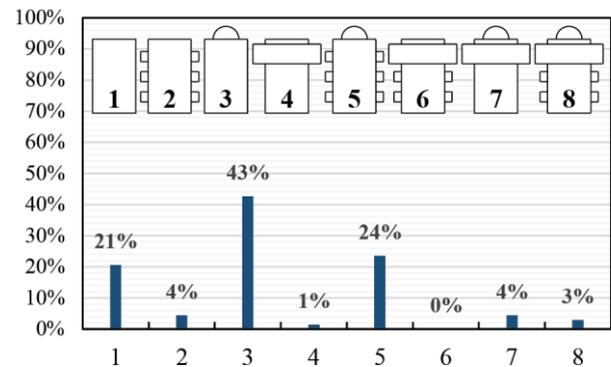


Figura 5. Caratterizzazione tipologica del campione: tipologia di impianto

Sono state investigate, inoltre, la tipologia di copertura (anche se il dato è risultato essere mancante per circa un quarto del campione) e di muratura principalmente costituente il magistero murario (Figura 6, 7).

Inoltre, sulla scorta di vari studi condotti in tema vulnerabilità sismica delle chiese in muratura (Lagomarsino, 2006, Despotaki et al., 2018), è stato considerato significativo valutare anche la presenza di volte e catene, nonché la tipologia di campanile (Figure 8 e 9).

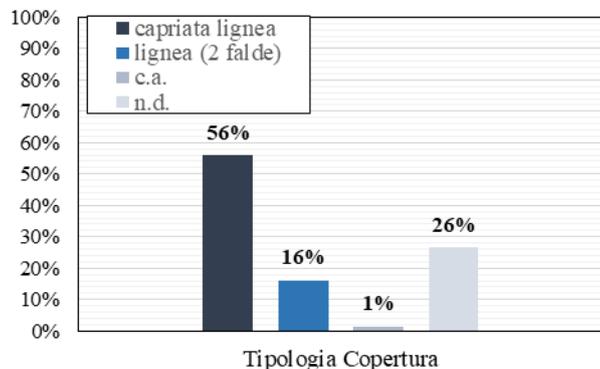


Figura 6. Caratterizzazione tipologica del campione: tipo di copertura

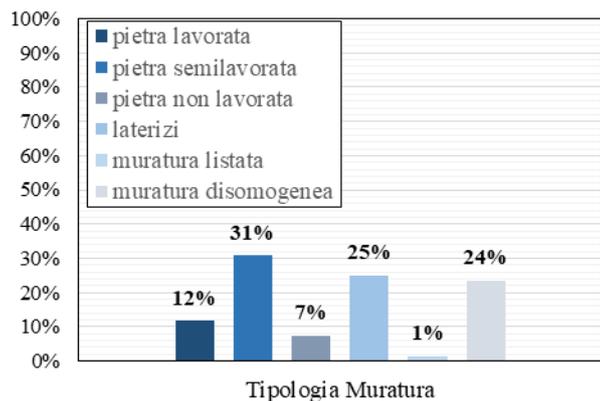


Figura 7. Caratterizzazione tipologica del campione: tipologia di muratura

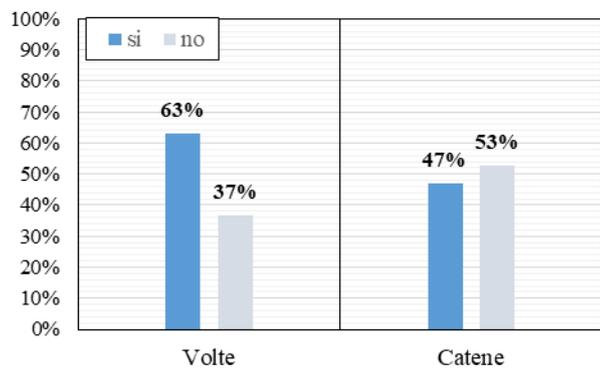


Figura 8. Caratterizzazione tipologica del campione; presenza di volte e catene

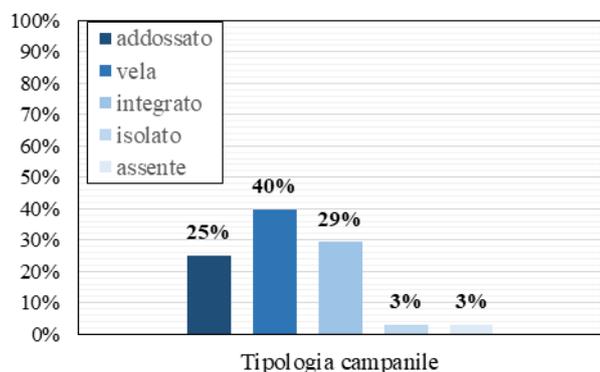


Figura 9. Caratterizzazione tipologica del campione: tipologia di campanile

La caratterizzazione tipologica del campione dimostra che, oltre che da un punto di vista

storico e geografico, il campione esaminato risulta fortemente eterogeneo anche per materiali e tecniche costruttive adottate, ciò anche e soprattutto in virtù del fatto della presenza nel campione considerato sia di chiese di principale importanza, che di chiese rurali e secondarie.

Altri parametri che testimoniano ampiamente l'eterogeneità del campione considerato sono quelli di natura geometrica. Infatti, dalla caratterizzazione geometrica del campione, condotta valutando la superficie totale di ingombro in pianta (Figura 10) e l'altezza massima interna della chiesa (Figura 11), risulta avvalorata la condizione che il campione considerato sia equamente composto da chiese aventi differenti livelli d'importanza.

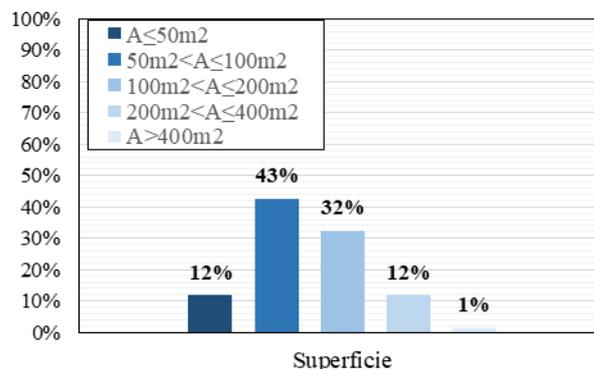


Figura 10. Caratterizzazione geometrica del campione: superficie di ingombro in pianta

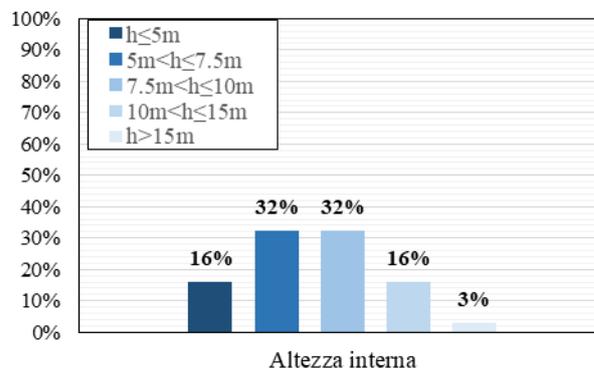


Figura 11. Caratterizzazione geometrica del campione: altezza interna

### 3.4 Vulnerabilità del campione

In seguito al rilievo del danno effettuato durante le attività d'ispezione, per ciascuna chiesa considerata è stato valutato l'indice di vulnerabilità attraverso la compilazione della *Scheda MaChro*, la quale, come detto, adotta la formulazione di Eq. (2) proposta nelle Linee Guida dei Beni Culturali (G.U. 2011).

I risultati ottenuti sono riportati in Figura 12 dove, per ciascuna chiesa identificata attraverso un acronimo, sono restituiti i valori degli indici di vulnerabilità ottenuti. Si segnala che, per

comodità di trattazione, non sono riportati in questa memoria i nomi e la locazione di ciascuna chiesa considerata con il corrispettivo acronimo assegnato, che tuttavia è possibile consultare nei precedenti lavori degli autori, ad es. in De Matteis e Zizi (2019).

induce mediamente ad ottenere valori della vulnerabilità molto prossimi al valore 0.5, come anche ottenuto in De Matteis et al. (2019) su un campione di 64 chiese a tre navate danneggiate dal terremoto de L'Aquila 2009.

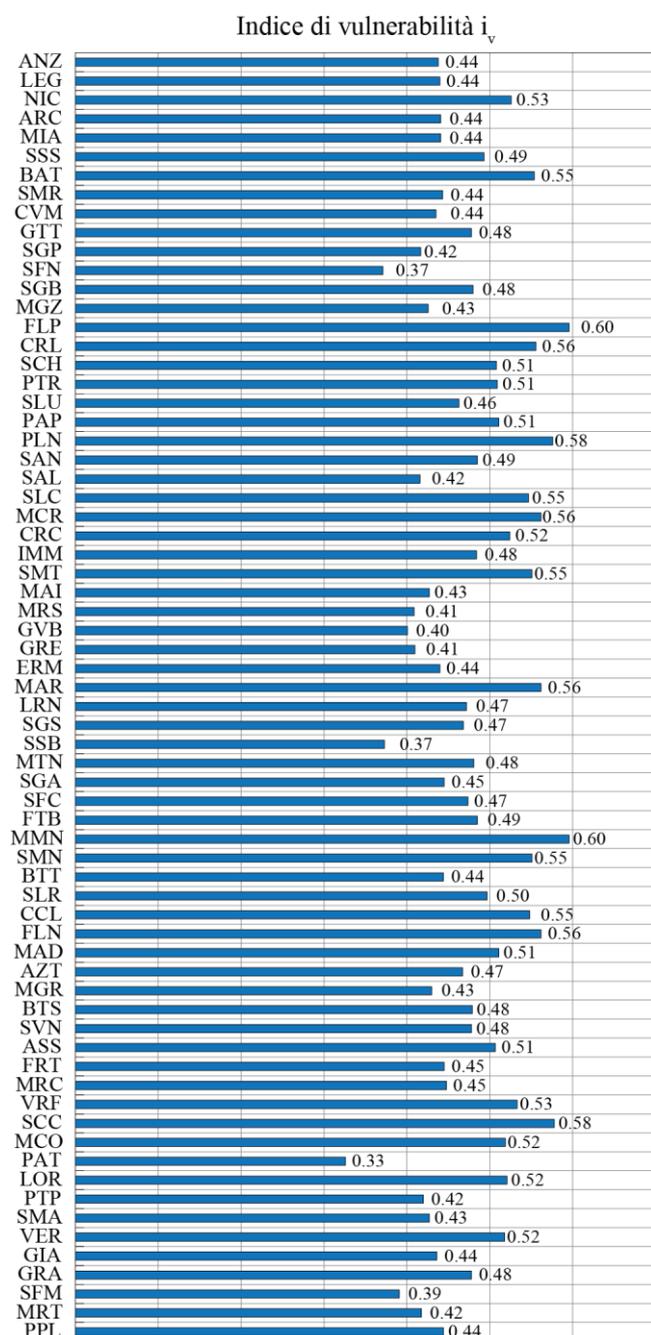


Figura 12. Indici di vulnerabilità delle chiese analizzate

Le rielaborazioni effettuate hanno mostrato come, per le 68 chiese analizzate, si sia ottenuto un indice di vulnerabilità compreso tra 0.33 e 0.6, con una media di 0.48 e una varianza statistica molto bassa (0.035).

Tale aspetto è da ricondursi al fatto che il campione considerato è composto da chiese ad una navata, quindi sostanzialmente con strutture non estremamente complesse. Tuttavia è d'uopo specificare che, la formulazione di Equazione (2)

## 4 ANALISI DI SENSITIVITÀ

### 4.1 Introduzione

Sulla base delle informazioni reperite e rielaborate per ottenere gli indici analitici di vulnerabilità per ciascuna chiesa, si è operata un'analisi di sensitività con il fine di valutare l'eventuale dipendenza del comportamento sismico dei manufatti considerati da ciascun parametro qualitativo, sia esso di natura storica, tipologica o geometrica. I parametri considerati nel presente studio sono:

- Secolo di costruzione;
- Tipologia di impianto;
- Tipologia di muratura;
- Presenza di volte;
- Presenza di catene (longitudinali e/o trasversali);
- Tipologia campanile;
- Superficie in pianta;
- Altezza interna.

Si segnala che, essendo il dato mancante per circa un quarto del campione, non è stato possibile investigare l'influenza della tipologia di copertura.

### 4.2 I risultati ottenuti

Con riferimento al secolo di prima costruzione è stato valutato che, generalmente, le chiese realizzate tra il XVII e il XIX secolo risultano caratterizzate mediamente da un indice di vulnerabilità più alto rispetto a quelle costruite precedentemente o nel XX secolo (Figura 13). Tale evidenza risulta fortemente in accordo con De Matteis et al. (2016), dove gli autori, nello studio condotto su chiese danneggiate dopo il terremoto de L'Aquila 2009, riscontrarono minori livelli di danneggiamento per chiese classificate come "medievali" e dunque realizzate prima del XV secolo.

Per quanto riguarda l'impianto, invece, attesa la maggiore rappresentanza di alcune tipologie all'interno del campione considerato, è stata valutata l'influenza del parametro in funzione delle tre tipologie più ricorrenti (Tipologia 1, 3 e 5), mentre le rimanenti tipologie sono state raggruppate in un'unica categoria (Figura 14). Si può osservare che, a differenza di quanto

riscontrato per l'epoca costruttiva, tale parametro non è risultato particolarmente influente nei confronti della vulnerabilità delle chiese costituenti il campione considerato. Si specifica comunque che, trattandosi di un campione omogeneo, ovvero composto da sole chiese ad una navata, risulta opportuno, per valutare l'effettiva incidenza di questo parametro sull'indice di vulnerabilità, estendere questa valutazione ad un campione maggiormente eterogeneo, cioè composto anche da chiese con diverso impianto (ad es. chiese a più navate, chiese a pianta centralizzata, etc.)

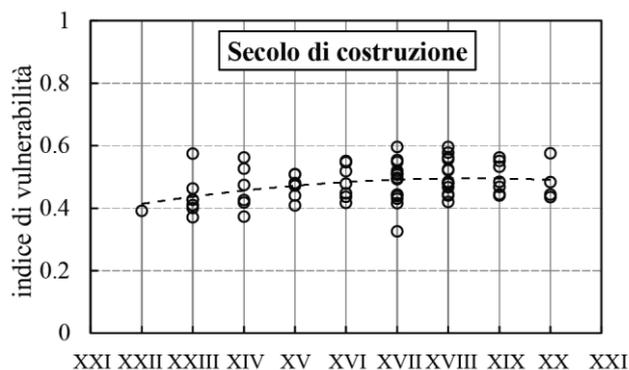


Figura 13. Analisi di sensitività: incidenza del secolo di costruzione



Figura 14. Analisi di sensitività: incidenza della tipologia di impianto

Per contro, il parametro tipologia di muratura è risultato essere particolarmente significativo e influente nei confronti della vulnerabilità sismica valutata analiticamente. A tal fine si sono identificate tre macro-categorie di qualità della muratura, sulla scorta della caratterizzazione precedentemente riportata:

- Muratura di buona qualità (comprendente muratura in blocchi di pietra lavorati e muratura listata);
- Muratura di media qualità (comprendente muratura in pietra semilavorata e muratura listata);
- Muratura di scarsa qualità (comprendente muratura disomogenea o in pietra non lavorata).

La rielaborazione ha restituito una forte dipendenza della vulnerabilità sismica dalla qualità del magistero murario (Figura 15), a testimonianza del fatto che la tecnica di costruzione adottata gioca un ruolo fondamentale sul comportamento sismico delle chiese considerate.

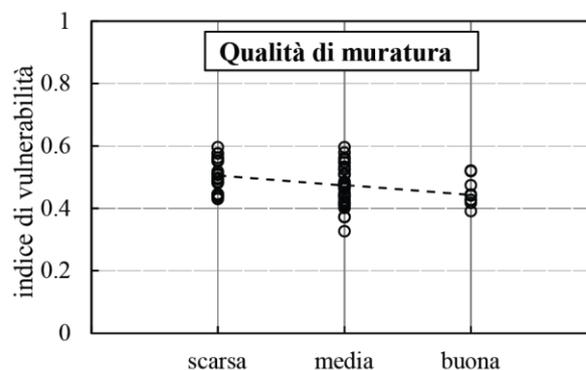


Figura 15. Analisi di sensitività: incidenza della qualità della muratura

Le successive analisi di sensitività hanno mostrato come anche la presenza di strutture voltate rappresenti un importante elemento di valutazione (Figura 16). Tale evidenza, inoltre, risulta confermata dai rilievi del danno effettuati proprio su questo campione di chiese dagli autori di questa memoria, i quali hanno valutato, con riferimento ad archi e volte, l'indice di danno medio maggiore tra tutti i macroelementi (De Matteis e Zizi 2019).

Diversamente, la presenza di catene (siano esse longitudinali o trasversali) non è risultata particolarmente incidente sulla vulnerabilità sismica valutata analiticamente (Figura 17). Su questo aspetto è importante segnalare che il dato qualitativo analizzato non tiene in alcun modo conto né della eventuale presenza e/o efficienza dei capochiave, né tantomeno della direzione, del numero e della completezza di tali presidi. D'altra parte, un'analisi più dettagliata, sebbene possa eventualmente fornire un'incidenza più significativa della presenza o meno delle catene, non risulta significativa ai fini del presente studio, il quale si propone di identificare parametri qualitativi per la determinazione speditiva della vulnerabilità sismica di chiese in muratura ad una scala nazionale e dunque senza la necessità di effettuare specifici sopralluoghi.

Anche la tipologia di campanile è stata valutata come influente sulla vulnerabilità sismica delle chiese del campione considerato. Infatti è stato osservato come strutture con campanile a vela o addossato risultino generalmente caratterizzate da valori di

vulnerabilità maggiori rispetto a strutture con campanili integrati e isolati o assenti (Figura 18).

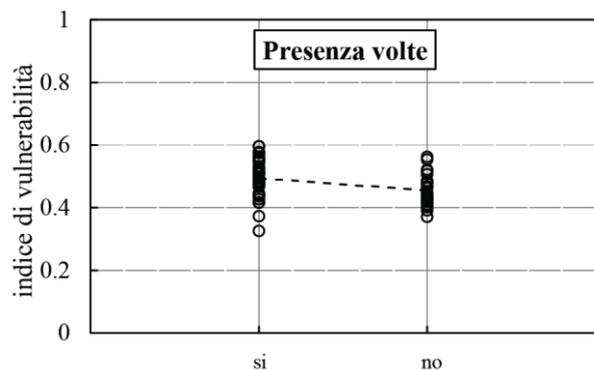


Figura 16. Analisi di sensitività: incidenza della presenza di strutture voltate

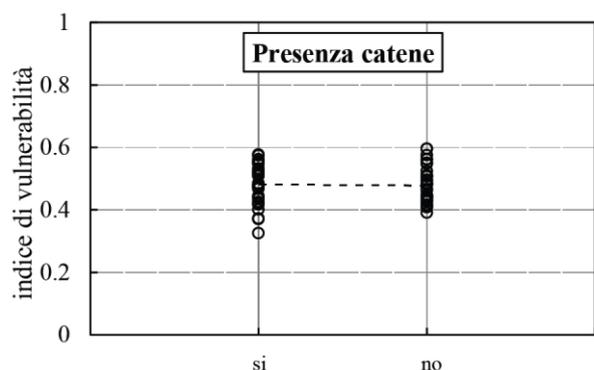


Figura 17. Analisi di sensitività: incidenza della presenza di catene

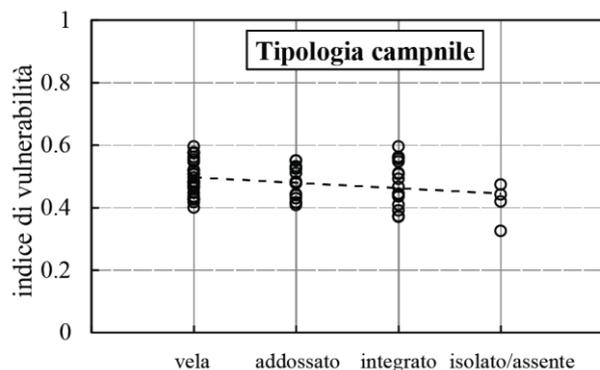


Figura 18. Analisi di sensitività: incidenza della tipologia di campanile

Con riferimento all'ultima tipologia considerata (campanile isolato o assente), si specifica comunque che il dato non può essere considerato particolarmente significativo in quanto nel campione sono presenti solo 4 chiese la cui struttura non interagisce direttamente con quella dell'eventuale campanile. Tuttavia, la struttura del campanile, sia essa aggettante o composta da una cella ed un'eventuale torre campanaria, essendo comunemente contraddistinta da una particolare snellezza, risulta essere maggiormente vulnerabile da un punto di vista sismico, attese le sue peculiarità

geometriche. Il risultato ottenuto, seppur da intendersi come preliminare e ancora poco significativo da un punto di vista statistico, risulta in accordo con una possibile valutazione qualitativa.

Infine, con riferimento alle dimensioni geometriche delle chiese considerate (superficie ed altezza interna), sono stati valutati andamenti dell'indice di vulnerabilità pressoché parabolici. In particolare è stato rilevato che chiese di piccole dimensioni ( $A \leq 50m^2$  e  $h \leq 5m$ ) risultano significativamente vulnerabili, quasi al pari delle chiese di grandi dimensioni ( $A > 200m^2$  e  $h > 10m$ ) (Figura 19, 20).

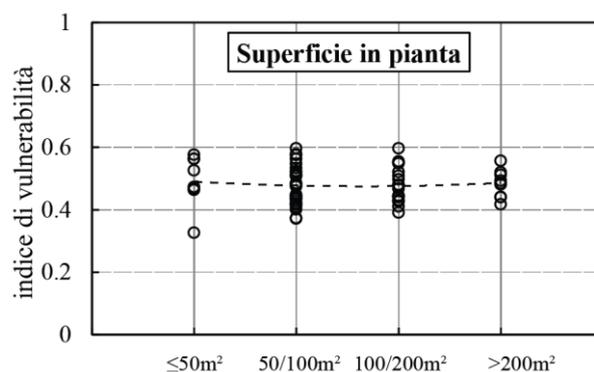


Figura 19. Analisi di sensitività: incidenza della superficie in pianta

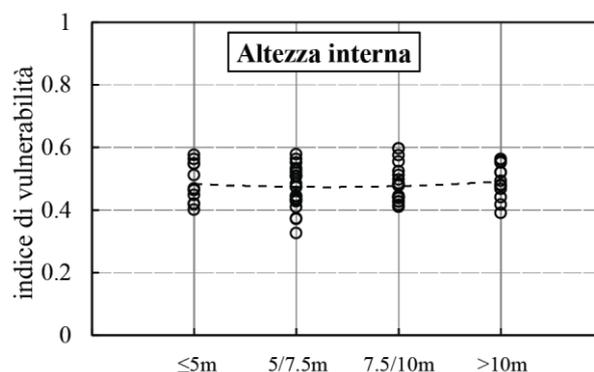


Figura 20. Analisi di sensitività: incidenza dell'altezza interna

Tale aspetto si ritiene possa ricondursi al fatto che gli edifici di piccole dimensioni corrispondano principalmente a piccole chiese rurali ovvero a strutture di secondaria importanza e pertanto realizzate con tecniche meno raffinate; per contro gli edifici ecclesiastici di maggiore prestigio, i quali altresì sono sì contraddistinti da una migliore qualità costruttiva, risultano caratterizzati da una più alta vulnerabilità in virtù della loro maggiore complessità strutturale.

#### 4.3 Principali evidenze dello studio

Lo studio di sensitività condotto, mettendo a confronto gli indici di vulnerabilità valutati analiticamente per mezzo della *Scheda MaChro* e

in funzione di parametri storici, tipologici e geometrici investigati, per il campione investigato (68 chiese), ha permesso una prima identificazione, in termini qualitativi, dei fattori che maggiormente influenzano il comportamento sismico delle chiese in muratura ad una navata.

In particolare è stato valutato che la risposta sismica delle chiese risulta maggiormente influenzata oltre che dalla qualità del magistero murario, anche dalla tipologia di campanile (se presente) e dalla presenza di strutture voltate.

Inoltre, anche le caratteristiche geometriche (superficie in pianta e altezza interna) possono risultare importanti sulla vulnerabilità sismica, al pari dell'epoca di costruzione.

Per contro, la vulnerabilità sismica sembra non essere influenzata dalla tipologia di impianto, almeno nel caso di specie, dove il campione considerato risulta caratterizzato da sole chiese ad una navata.

Infine, la presenza di catene, sebbene sia un dato particolarmente importante ai fini del comportamento strutturale di chiese in muratura sotto l'azione sismica, attesa la loro funzionalità di scongiurare l'attivarsi di meccanismi fuori-piano, può essere considerato un dato troppo generico non essendo specificata, attraverso l'informazione qualitativa considerata, né l'efficienza (ad es. tipologia di capochiave) né tantomeno la tipologia, il numero e la completezza del presidio (ad es. tipologia di catena trasversale/longitudinale, ordini di applicazione).

## 5 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il patrimonio culturale italiano ed in particolare quello ecclesiastico, attesa la notevole vulnerabilità sismica da cui esso risulta caratterizzato, necessita l'adozione di politiche preventive e lungimiranti finalizzate alla conservazione ed alla protezione strutturale.

Nell'ottica di uno sviluppo di tali politiche, da condursi con un approccio a scala nazionale, la definizione di modelli semplificati di valutazione della vulnerabilità per la determinazione di mappe di rischio e dunque di priorità di intervento, risulta compito arduo e complesso, che, recentemente, il mondo della ricerca scientifica sta provando ad affrontare con una certa determinazione.

Nella presente memoria, con il fine di perseguire questo obiettivo, è stato presentato uno studio preliminare di sensitività. In particolare, considerando un campione di 68 chiese in muratura ad una navata ispezionate dopo gli

eventi sismici occorsi nel Centro Italia 2016/2017, sono stati investigati parametri storici, tipologici e geometrici facilmente reperibili a scala nazionale, con il fine di valutarne l'influenza sulla vulnerabilità sismica, determinata analiticamente per mezzo della *Scheda MaChro*, in accordo con quanto indicato nelle Linee Guida dei Beni Culturali (G.U. 2011).

Lo studio preliminare, il quale necessita di essere ampliato ed applicato anche ad altri campioni caratterizzati da chiese (ad es. con differente tipologia di impianto), ha permesso una prima selezione dei parametri che sembrerebbero influenzare maggiormente la risposta sismica di tali edifici, ponendo le basi per ulteriori sviluppi futuri consistenti nella definizione di uno specifico modello empirico, tanto semplificato quanto attendibile, applicabile a scala nazionale.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Benedetti, D., Petrini, V., 1984. On the seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure, *L'Industria Italiana delle Costruzioni* **149**, 66–78.
- Braga, F., Dolce, M., Liberatore, D., 1982. A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the M.S.K76 scale, *Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering*, Atene, Grecia.
- Brandonisio, G., Lucibello, G., Mele, E., De Luca, A., 2013. Damage and Performance Evaluation of Masonry Churches in the 2009 L'Aquila Earthquake, *Engineering Failure Analysis* **34**, 693–714.
- Calvi, G.M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J.J., Restrepo-Vélez, L.F., Crowley, H., 2006. Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years, *Journal of Earthquake Technology* **43** (3), 75–104.
- Criber, E., Brando, G., De Matteis, G., 2015. The effects of L'Aquila earthquake on the St. Gemma church in Goriano Sicoli: part I—damage survey and kinematic analysis, *Bulletin of Earthquake Engineering*. doi:0.1007/s10518-015-9792-4.
- D'Amato, M., Laterza, M., Diaz Fuentes, D., 2018. Simplified Seismic Analyses of Ancient Churches in Matera's Landscape, *International Journal of Architectural Heritage*, doi:10.1080/15583058.2018.1511000.
- 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*. doi: 10.1007/s10518-019-00656-7.
- 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), 120–45.
- De Matteis, G., Brando, G., Cianchino, G., Corlito, V., Criber, E., 2017. The MaChro Form: A new automatic tool for the survey and seismic vulnerability assessment of churches. *XVII Convegno ANIDIS, L'Ingegneria Sismica in Italia*. Settembre 17-21, Pistoia, Italia.

- De Matteis, G., Zizi, M., 2019. Seismic Damage Prediction of Masonry Churches by a PGA-Based Approach. *International Journal of Architectural Heritage*. doi:10.1080/15583058.2019.1597215.
- Despotaki, V., Silva, V., Lagomarsino, S., Pavlova, I., Torres, J., 2018. Evaluation of Seismic Risk on UNESCO Cultural Heritage Sites in Europe, *International Journal of Architectural Heritage* **12** (7–8), 1231–1244.
- Díaz Fuentes, D, Baquedano Julià, P. A., D’Amato, M., Laterza, M., 2019. Preliminary Seismic Damage Assessment of Mexican Churches after September 2017 Earthquakes. *International Journal of Architectural Heritage*. doi:10.1080/15583058.2019.1628323.
- G.U. no. 47. 2011, Febbraio 26. (suppl. ord. no. 54). Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri, 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. Roma, Italia.
- Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT), 1993. Rischio Sismico Di Edifici Pubblici, Parte I: Aspetti Metodologici, *Proceedings of CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*. Roma, Italia.
- Grünthal, G., 1998. European Macroseismic Scale 1998 : EMS-98. *European Seismological Commission, Subcommission on Engineering Seismology, Working Group Macroseismic scales*, 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.
- Lagomarsino, S., Podestà, S., Cifani, G., Lemme, A., 2004. The 31st October 2002 Earthquake in Molise (Italy): A new methodology for the damage and seismic vulnerability survey of churches, *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Agosto 1-6, Vancouver, Canada.
- 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.
- Lagomarsino, S., 2006. On the Vulnerability Assessment of Monumental Buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering* **4** (4), 445–463
- Marotta, Alessandra, Luigi Sorrentino, Domenico Liberatore, and Jason M. Ingham. 2017. “Vulnerability Assessment of Unreinforced Masonry Churches Following the 2010–2011 Canterbury Earthquake Sequence.” *Journal of Earthquake Engineering* 21 (6). Taylor & Francis: 912–934. doi:10.1080/13632469.2016.1206761.
- Palazzi, N. C., Rovero, L., De La Llera, J.C., Sandoval, C., 2019. Preliminary Assessment on Seismic Vulnerability of Masonry Churches in Central Chile, *International Journal of Architectural Heritage*. doi: 10.1080/15583058.2019.1570388
- Sandi, H., Floricel, I., 1994. Analysis of seismic risk affecting the existing building stock, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, vol. 2*, Rotterdam, Olanda.

## RINGRAZIAMENTI

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