

# **Vulnerabilità sismica dei beni monumentali ecclesiastici: evidenze del comportamento strutturale in seguito al terremoto del centro Italia del 24 agosto 2016**

CARLO PELLEGRINO E LORENZO HOFER\*

## ***Introduzione***

Le costruzioni ecclesiastiche costituiscono una parte fondamentale del patrimonio artistico, storico e culturale del nostro paese. Nell'intero territorio nazionale sono presenti più di 65.000 chiese, circa 8 per ogni comune. La storia recente dimostra come tali costruzioni siano particolarmente vulnerabili alle sollecitazioni di origine sismica. Il 26 settembre 1997, le immagini del crollo della volta della Basilica di San Francesco ad Assisi hanno fatto il giro del mondo (Fig. 1).

Da allora numerosi eventi sismici si sono susseguiti in Italia, con estesi danneggiamenti alle chiese collocate nelle zone interessate dai diversi terremoti. In particolare, si ricordano il terremoto de L'Aquila (6 aprile 2009 con magnitudo  $M_w = 6.29$ ), il terremoto dell'Emilia (20 maggio 2012,  $M_w = 6.09$  e 29 maggio 2012,  $M_w = 5.9$ ), fino ad arrivare ai recenti eventi sismici nell'Italia centrale, il 24 agosto 2016 (Amatrice,  $M_w = 6.0$ ), il 30 ottobre 2016 (Norcia,  $M_w = 6.5$ ), il 18 gennaio 2017 (Norcia,  $M_w = 5.5$ ), e al terremoto di Casamicciola il 21 agosto 2017 ( $M_w = 4$ ).

In seguito a tutti questi eventi, i danni subiti dalle chiese, e da edifici storici più in generale, hanno dimostrato l'alta vulnerabilità sismica di queste tipologie strutturali. Ciò è principalmente dovuto ad una serie di concause, che combinate, contribuiscono a rendere questi edifici particolarmente suscettibili ad estesi danneggiamenti se sollecitati da un'azione di tipo sismico. Infatti, nella gran parte dei casi, si tratta di strutture di non recente costruzione, talvolta con storie centenarie alle spalle, dove la conformazione strutturale e il degrado dei materiali rappresentano dei fattori determinanti per la valutazione della vulnerabilità sismica. Inoltre, la loro numerosità sul territorio nazionale comporta la difficoltà

\* Dipartimento di Ingegneria civile, Edile e Ambientale, Università di Padova carlo.pellegrino@unipd.it, lorenzo.hofer@unipd.it

di attuare un piano di miglioramento sismico diffuso, che risulta spesso limitato ai monumenti principali e più importanti. Stabilire una priorità degli interventi da effettuare comporta inevitabilmente l'esclusione di alcune strutture secondarie, talvolta di rilievo artistico-architettonico. Si evidenzia inoltre la difficoltà tecnica di intervenire su strutture uniche, ognuna con le proprie caratteristiche specifiche – come la geometria, i materiali e il metodo di costruzione – per le quali non sono possibili interventi standardizzati, ma strategie che necessitano di uno studio specifico e approfondito.

L'obiettivo di questo contributo è quello di fornire alcuni elementi per la comprensione del comportamento strutturale di edifici ecclesiastici storici in muratura, con particolare riferimento al rilievo dei danni svolto da un team di ricercatori del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA) dell'Università di Padova in seguito all'evento sismico del 24 agosto 2016 nella zona di Amatrice<sup>1</sup>.

### **1. Il terremoto del 24 agosto 2016 ad Amatrice**

Il 24 agosto 2016, alle ore 3:36, un terremoto di magnitudo  $M_w = 6.0$ , con epicentro localizzato tra i comuni di Amatrice e Accumoli (42.70° N, 13.24° E), colpisce una vasta zona dell'Italia centrale, compresa nelle regioni Lazio, Umbria, Marche ed Abruzzo. Tale area non è nuova ad eventi sismici di una certa rilevanza, come dimostrano i terremoti degli ultimi vent'anni e come si può evincere dal Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani<sup>2</sup>. La Fig. 2 mostra tutti gli eventi dal 1600 ad oggi che hanno interessato la zona dal centro Italia e che hanno provocato dei danneggiamenti nel Comune di Accumoli, valutati con la scala macrosismica Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS). In particolare, considerando i dati dal 1900, si nota come ad Accumoli sia stato percepito un terremoto ( $I_{MCS} \geq 4$ ) in media ogni tre anni.

Nei giorni immediatamente successivi il terremoto del 24 agosto, un *team* di ricercatori del Dipartimento ICEA si è recato nell'area interessata dall'evento con l'obiettivo di evidenziare le principali fonti di vulnerabilità delle chiese analizzate e rilevare il danneggiamento subito.

La Fig. 3 mostra la mappa di scuotimento in termini di accelerazione di picco al suolo (PGA), e le 196 chiese ispezionate. Si nota come esse siano un campione rappresentativo per tutto il range di PGA, da 0.05g (g è l'accelerazione di gravità) a 0.55g. Data la tempestività del sopralluogo, il rilievo effettuato risulta particolarmente significativo, dato che può essere associato direttamente all'evento principale del 24 agosto.

<sup>1</sup> Una trattazione estesa di tale studio può essere trovata in HOFER ET AL. 2018.

<sup>2</sup> CPTI15 2016.

## 2. Caratteristiche strutturali delle chiese analizzate

Le chiese analizzate, presenti nell'area colpita dal terremoto, presentano delle caratteristiche peculiari che le rendono un campione abbastanza omogeneo. Circa il 90% del totale, sono infatti delle piccole chiese distribuite in paesi sparsi sulle zone collinari e montuose del centro Italia. Molte di queste sono state costruite dagli abitanti dei paesi utilizzando materiali locali, talvolta di qualità povera, e adottando forme architettoniche semplici: sono infatti di forma rettangolare, composte da una navata unica e senza abside. Tipicamente le finestre sono collocate sui due lati lunghi che sostengono le capriate della copertura, mentre in quello corto è prevista l'entrata principale e la facciata. I muri sono principalmente composti di muratura di pietrame, e in molti casi non risultano intonacati. Il rimanente 10% del campione fa riferimento a chiese di dimensioni maggiori, collocate nei centri-città e caratterizzate da una struttura e forma architettonica più complesse.

## 3. Metodo per il rilievo del danno

Il rilievo del danno è stato effettuato in accordo alla metodologia proposta dal MIBACT<sup>3</sup>. Tale metodologia è stata ampiamente adottata e validata nel corso degli anni sia a livello nazionale che internazionale<sup>4</sup> e si basa sulla tipica risposta strutturale che presentano le chiese in muratura soggette ad una sollecitazione di tipo sismico. In particolare, il comportamento strutturale di tali edifici può essere rappresentato attraverso una serie di meccanismi predefiniti che si manifestano correntemente seppure si tratti di manufatti realizzati in epoche, con tecnologie, dimensioni e forme differenti. I meccanismi di danno caratteristici per le chiese permettono quindi di descrivere i danni subiti dall'intera costruzione attraverso la suddivisione della struttura in macroelementi. Ogni macroelemento, è una parte di fabbricato per il quale è osservabile e compiutamente descrivibile un comportamento unitario e riconoscibile nell'ambito della risposta sismica del fabbricato nel suo complesso. Il moto dei macroelementi durante l'azione sismica definisce il cinematismo di collasso, il quale può manifestarsi con vari livelli di danno, dalla lesione al crollo. Per il rilievo del danneggiamento subito da una chiesa, vanno quindi riconosciuti i possibili meccanismi attivabili, e quando viene rilevata l'attivazione di uno di essi deve essere stimata l'entità del danno associato a tale meccanismo (da 1 - danno lieve, a 5 - crollo). È quindi possibile ricavare un *indice di danno* riassuntivo che quantifica il livello

<sup>3</sup> PCM-MiBAC 2006.

<sup>4</sup> LEITE, LOURENCO, INGHAM 2013.

medio di danno subito dalla chiesa in esame, dato dalla seguente formula:

$$I_d = \frac{\sum_{k=1}^n d_k}{5n}$$

dove rappresenta il livello di danno associato a ciascun meccanismo possibile (0 - 5) e è il numero di meccanismi possibili. Questa metodologia prevista dal MiBACT individua in totale 28 meccanismi attivabili, suddivisi nel modo seguente<sup>5</sup>:

- meccanismi per la facciata, 1 - 4;
- meccanismi per l'aula, 5 - 9;
- meccanismi per il transetto, 10 - 12;
- meccanismo per l'arco trionfale, 13;
- meccanismi per cupola/tamburo/lanterna, 14 - 15;
- meccanismi per l'abside, 16 - 18;
- meccanismi per la copertura, 19 - 21;
- meccanismi per cappelle/corpi annessi, 22 - 25;
- meccanismi per aggetti/campanile, 26 - 28.

#### 4. Risultati

Il rilievo effettuato ha mostrato come il comportamento strutturale di tale tipologia edilizia, sia governato dall'attivazione o meno di tali meccanismi di collasso, dovuta principalmente all'assenza di buone connessioni tra le pareti e all'interno della parete stessa nel caso di muro a doppia cortina. La Fig. 4a mostra i meccanismi riscontrati nelle 196 chiese ispezionate. Si nota come gran parte di essi riguardino la facciata della chiesa (1 - 3), i meccanismi di taglio nelle pareti laterali (6) e gli aggetti/campanili (26 - 28). La Fig. 4b mostra invece il livello di danno medio per ogni meccanismo attivato.

La Fig. 5 mostra, a titolo di esempio, il collasso per ribaltamento della facciata della chiesa di Santa Maria a Torrita. La tessitura muraria appare di scarsa qualità, con blocchi irregolari sia per forma sia per dimensione con una scarsa connessione trasversale. La Fig. 5 mostra inoltre la chiesa della frazione di Tino (Amatrice), con l'innesco della rotazione rigida della facciata. In particolare, si possono notare le fessure verticali che denotano il distacco

<sup>5</sup>Un'estesa descrizione dei meccanismi di collasso in edifici esistenti in muratura è riportata in Repertorio dei meccanismi di danno 2005.

della facciata dalle pareti laterali. Nel caso di ribaltamento della facciata, la presenza di catene longitudinali e di un ammorsamento di buona qualità tra la facciata e i muri della navata contribuisce ad un buon comportamento di questo macroelemento.

La città di Norcia rappresenta una delle città principali localizzate dell'area colpita dal terremoto del 24 agosto 2016, nella quale sono presenti costruzioni caratterizzate da una qualità muraria migliore e una forma architettonica più ricercata. Sebbene la muratura della chiesa di Santa Maria Argentea di Norcia sia di qualità superiore, con buona qualità dei materiali e tessitura più regolare, la Figura 6 mostra la fessurazione tipica dell'innesco di un meccanismo nella sommità della facciata. Un meccanismo analogo viene rilevato nella facciata della chiesa di Mosaicchio, dove si può notare una lunga fessura orizzontale ed una fessura verticale al centro dell'elemento. Anche in questo caso di danneggiamenti alla sommità della facciata, la presenza di collegamenti efficaci con la copertura (travi-catene) e/o di controventi di falda contribuisce ad un buon comportamento di questo macroelemento. Viceversa, la presenza di una sommità a vela di grande dimensione e peso e/o una trave di colmo pesante in calcestruzzo armato, favoriscono l'innesco di tale meccanismo.

Altri danneggiamenti ricorrenti riscontrati nelle chiese analizzate, riguardano i meccanismi di taglio nella facciata e nelle pareti laterali. In questo caso, tali meccanismi si attivano con deformazioni nel piano per rottura a taglio della muratura e sono favoriti da grandi aperture e/o elevata snellezza della parete. Il quadro fessurativo che ne deriva è rappresentato da lesioni con andamento obliquo nella muratura (Fig. 7).

Il campanile rappresenta un ulteriore macroelemento tipico delle costruzioni ecclesiastiche, caratterizzato da un'alta vulnerabilità nei confronti delle azioni indotte dal terremoto. Il meccanismo si attiva con la deformazione nel piano degli archi o all'estremità dei piedritti, con lesioni negli archi stessi e/o rotazioni o scorrimenti dei piedritti. In particolare, la presenza di piedritti tozzi e/o archi di luce ridotta, di cerchiature e/o catene, diminuisce la vulnerabilità sismica di questo macroelemento. Viceversa, una massa significativa in sommità, come ad esempio una copertura pesante, ne favorisce l'attivazione. La Fig. 8 mostra il danneggiamento del campanile della chiesa di Santa Giuliana a San Pellegrino (Norcia), e il quadro fessurativo riportato dal campanile della Chiesa di Santa Giusta ad Amatrice.

In diversi casi, si nota l'effetto benefico introdotto dalla presenza delle catene che rappresentano un vincolo al ribaltamento (Fig. 9).

Si riportano infine due foto scattate dagli autori, rappresentanti le fessurazioni dovute all'innesco di meccanismi di taglio e ribaltamento dell'abside (Fig. 10).

## Conclusioni

Nei giorni immediatamente successivi l'evento sismico del 24 agosto 2016, un *team* di ricercatori del Dipartimento ICEA dell'Università di Padova, si è recato nell'area colpita dal terremoto, con l'obiettivo di rilevare i danni subiti dalle chiese della zona appenninica del centro Italia. Alla luce di tale rilievo, il presente lavoro ha riportato le principali osservazioni effettuate delineando il comportamento strutturale delle chiese in muratura.

Il *dataset* di chiese ispezionate risulta sostanzialmente omogeneo, caratterizzato da strutture a pianta rettangolare e geometria semplice, molte volte costruite da muratura vecchia e di scadente qualità. Gran parte dei meccanismi osservati riguardano la facciata, con il ribaltamento o la fessurazione diagonale della stessa. Per quanto riguarda le pareti laterali, in molti casi sono state rilevate delle lesioni ad andamento obliquo, caratterizzanti l'innescò di meccanismi di taglio della parete.

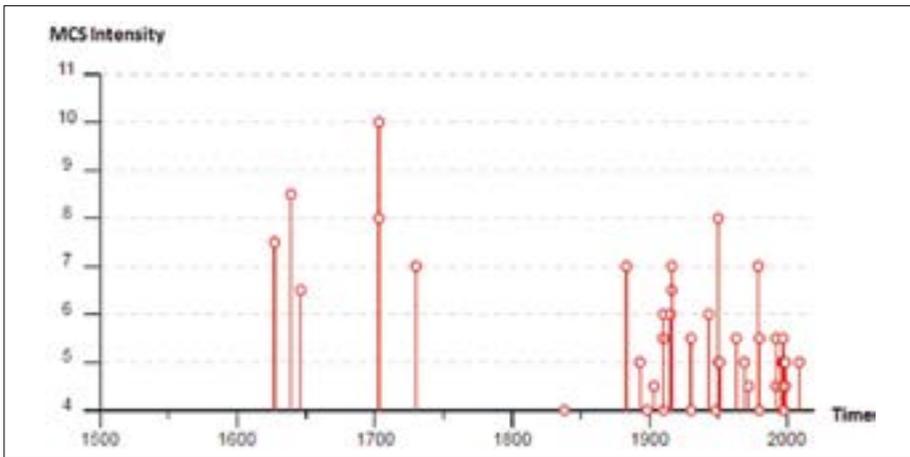
In generale, è stata quindi notata una elevata vulnerabilità sismica del costruito ecclesiastico, con vasti danneggiamenti su tutte le chiese del cratere sismico. Nuovamente, si presenta in Italia la drammatica necessità di provvedere ad interventi di miglioramento sismico e di rinforzo, per la salvaguardia del patrimonio storico, artistico e culturale diffuso sul territorio nazionale.

## Abstract

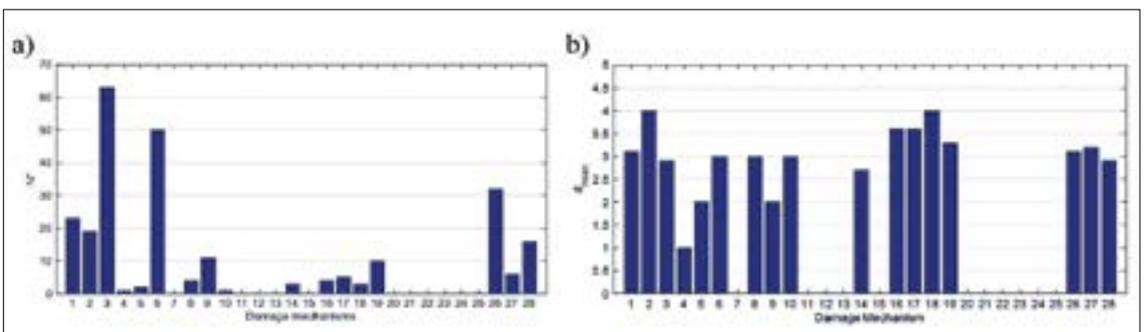
*This paper presents the results of a damage survey conducted on a wide stock of churches in Central Italy, hit by the August 24, 2016 Amatrice seismic sequence. In the weeks following the mainshock, the authors performed a damage assessment of 196 churches in the area involved by the seismic event, aiming to identify damage mechanisms and calculate damage index for each structure. Churches have similar characteristics within the analysed area, with typical architectural elements, homogeneous structural types and similar construction materials. The paper is subdivided mainly in two parts: the first one presents the historical seismicity of the considered area, with a description of the August 24, 2016 event, while the second mostly focuses on the damage survey. Results shows the high vulnerability of this structural typology, highlighting the need to develop a nationwide program for protecting the cultural heritage represented by the historical masonry churches.*



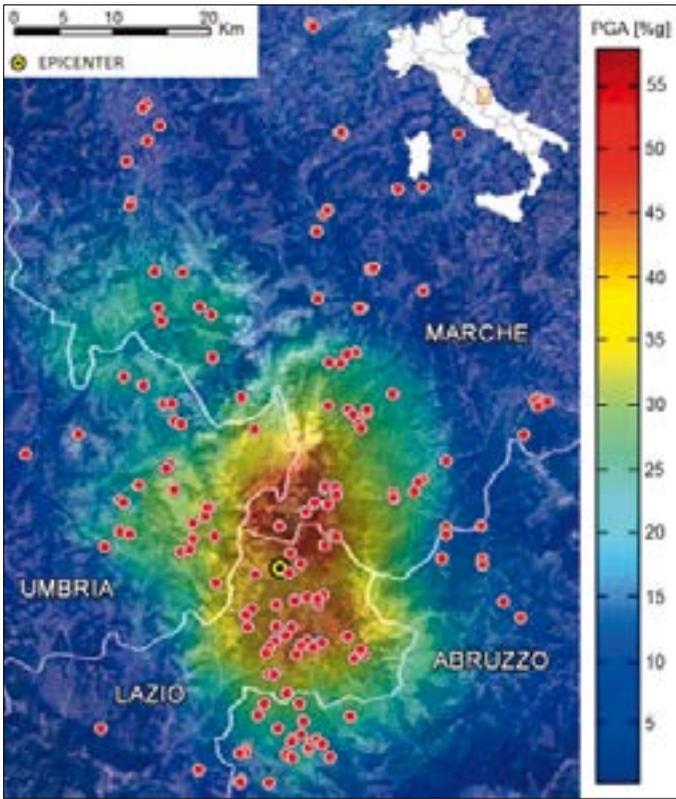
1. Terremoto Umbria - Marche ( $M_w = 5.97$ ), 26 settembre 1997: crollo della volta della Basilica di San Francesco ad Assisi



2. Danneggiamenti osservati ad Accumoli dal 1600 ad oggi (scala Mercalli-Cancani-Sieberg, CPTI15)



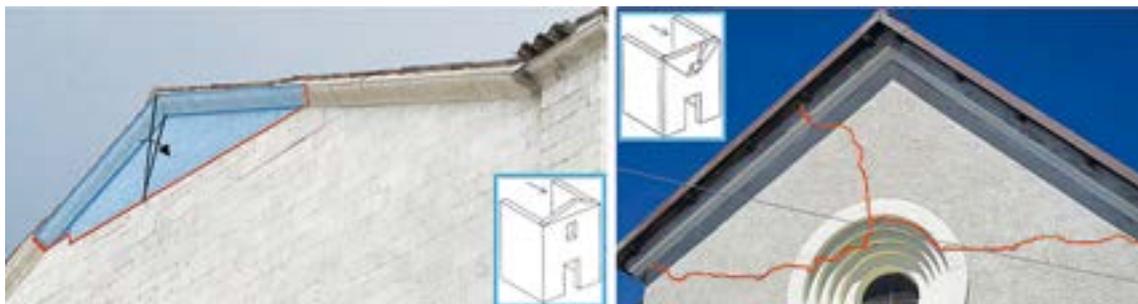
4. a) meccanismi riscontrati e b) livello di danno medio rilevato per ogni meccanismo.



3. Zona interessata dal terremoto del 24 agosto 2016, epicentro dell'evento e chiese analizzate (Hofer et al. 2018)



5. Ribaltamento della facciata della Chiesa di Santa Maria a Torrita (sinistra), innesco del ribaltamento della facciata della chiesa di Tino (destra)



6. Ribaltamento locale della sommità della facciata della Chiesa di Santa Maria Argentea (sinistra), fessurazione della sommità della facciata nella chiesa di Mosaicchio (destra)



7. Meccanismi di taglio nella facciata della chiesa di Scai (sinistra) e nella parete laterale della chiesa di Colli (destra)



8. Fessurazione del campanile della Chiesa di Santa Giuliana a San Pellegrino (sinistra) e del campanile della Chiesa di Santa Giusta ad Amatrice (destra)



9. Esempi di buon funzionamento delle catene



10. Chiesa di Visso (sinistra) e Chiesa di Bagnolo (destra)