



2017

IL CAPITALE CULTURALE

Studies on the Value of Cultural Heritage

JOURNAL OF THE SECTION OF CULTURAL HERITAGE

Department of Education, Cultural Heritage and Tourism
University of Macerata

eum



Il Capitale culturale

Studies on the Value of Cultural Heritage
n. 16, 2017

ISSN 2039-2362 (online)

Direttore / Editor

Massimo Montella

Co-Direttori / Co-Editors

Tommy D. Andersson, Elio Borghonovi,
Rosanna Cioffi, Stefano Della Torre, Michela
di Macco, Daniele Manacorda, Serge Noiret,
Tonino Pencarelli, Angelo R. Pupino, Girolamo
Sciullo

Coordinatore editoriale / Editorial Coordinator
Francesca Coltrinari

Coordinatore tecnico / Managing Coordinator
Pierluigi Feliciati

Comitato editoriale / Editorial Office

Giuseppe Capriotti, Mara Cerquetti, Francesca
Coltrinari, Patrizia Dragoni, Pierluigi Feliciati,
Valeria Merola, Enrico Nicosia, Francesco
Pirani, Mauro Saracco, Emanuela Stortoni

*Comitato scientifico - Sezione di beni
culturali / Scientific Committee - Division of
Cultural Heritage and Tourism*

Giuseppe Capriotti, Mara Cerquetti, Francesca
Coltrinari, Patrizia Dragoni, Pierluigi Feliciati,
Maria Teresa Gigliozzi, Valeria Merola,
Susanne Adina Meyer, Massimo Montella,
Umberto Moscatelli, Sabina Pavone, Francesco
Pirani, Mauro Saracco, Michela Scolaro,
Emanuela Stortoni, Federico Valacchi, Carmen
Vitale

Comitato scientifico / Scientific Committee

Michela Addis, Tommy D. Andersson, Alberto
Mario Banti, Carla Barbatì, Sergio Barile,
Nadia Barrella, Marisa Borraccini, Rossella
Caffo, Ileana Chirassi Colombo, Rosanna
Cioffi, Caterina Cirelli, Alan Clarke, Claudine
Cohen, Lucia Corrain, Giuseppe Cruciani,
Girolamo Cusimano, Fiorella Dallari, Stefano
Della Torre, Maria del Mar Gonzalez Chacon,
Maurizio De Vita, Michela di Macco, Fabio
Donato, Rolando Dondarini, Andrea Emiliani,

Gaetano Maria Golinelli, Xavier Greffe, Alberto
Grohmann, Susan Hazan, Joel Heuillon,
Emanuele Invernizzi, Lutz Klinkhammer,
Federico Marazzi, Fabio Mariano, Aldo M.
Morace, Raffaella Morselli, Olena Motuzenko,
Giuliano Pinto, Marco Pizzo, Edouard
Pommier, Carlo Pongetti, Adriano Prosperi,
Angelo R. Pupino, Bernardino Quattrococchi,
Mauro Renna, Orietta Rossi Pinelli, Roberto
Sani, Girolamo Sciullo, Mislav Simunic,
Simonetta Stopponi, Michele Tamma, Frank
Vermeulen, Stefano Vitali

Web

<http://riviste.unimc.it/index.php/cap-cult>

e-mail

icc@unimc.it

Editore / Publisher

eum edizioni università di macerata, Centro
direzionale, via Carducci 63/a - 62100
Macerata

tel (39) 733 258 6081

fax (39) 733 258 6086

<http://eum.unimc.it>

info.ceum@unimc.it

Layout editor

Marzia Pelati

Progetto grafico / Graphics

+crocevia / studio grafico



Rivista accreditata AIDEA
Rivista riconosciuta CUNSTA
Rivista riconosciuta SISMED
Rivista indicizzata WOS

Il paesaggio italiano raccontato

a cura di Sara Lorenzetti e Valeria Merola

Documenti

La vulnerabilità sismica degli edifici storici in muratura: dalla conoscenza agli interventi di consolidamento strutturale

Pardo Antonio Mezzapelle*
Francesco Clementi**
Stefano Lenci***

Abstract

I tragici eventi sismici che da agosto 2016 a gennaio 2017 hanno colpito una vasta area del Centro Italia, hanno nuovamente acceso i riflettori sull'elevata vulnerabilità del patrimonio storico-architettonico ampiamente diffuso sul territorio italiano.

* Pardo Antonio Mezzapelle, Ph.D. student, Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, via Breccie Bianche, 60131 Ancona, e-mail: p.a.mezzapelle@pm.univpm.it.

** Francesco Clementi, Ricercatore, Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, via Breccie Bianche, 60131 Ancona, e-mail: francesco.clementi@staff.univpm.it.

*** Stefano Lenci, Ordinario di Scienza delle costruzioni, Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, via Breccie Bianche, 60131 Ancona, e-mail: s.lenci@univpm.it.

Con un taglio il più divulgativo e meno tecnico possibile, e nei limiti di lunghezza richiesti, si vogliono illustrare le principali questioni legate alla mitigazione del rischio sismico, a partire dalla scarsa qualità muraria che rappresenta il maggior elemento di vulnerabilità, fino alle tecniche di intervento, passando per gli altri elementi di vulnerabilità, per la conoscenza dell'edificio, irrinunciabile per comprenderne il comportamento, e per le analisi strutturali necessarie per una affidabile ed oggettiva valutazione della vulnerabilità sismica.

The tragic seismic events that hit a large area of the Centre Italy, from August 2016 to January 2017, have again highlighted the high vulnerability of the historical and architectural heritage widely spread on the Italian land. With an exposition the most informative and the less technical possible, in the required length limit, the main issues regarding the seismic risk mitigation are treated. Starting from the poor quality of the masonry, which represents the main vulnerability factor, up to the intervention techniques, the paper deals about the other vulnerability factors, the knowledge of the building as the indispensable process to understand the seismic behaviour, and the structural analyses as necessary to provide a reliable and objective seismic vulnerability assessment.

1. Comportamento e vulnerabilità sismica degli edifici storici e monumentali in muratura

La sequenza di eventi sismici che dall'agosto 2016 hanno colpito il centro Italia su un'area molto vasta, con la prima forte scossa di magnitudo 6.0 di epicentro tra Accumoli ed Amatrice (fig. 1), passando per il sisma di Norcia dell'ottobre 2016 di magnitudo 6.5, fino alle scosse di magnitudo superiore a 5 nella zona del maceratese del gennaio 2017, hanno ancora una volta posto in evidenza la vulnerabilità del nostro patrimonio storico-architettonico. Come già avvenuto in passato, con i terremoti del Friuli (1976), Irpinia (1980), e non molto tempo fa con i terremoti dell'Aquila (2009) e dell'Emilia (2012), a pagare un prezzo molto alto sono stati i centri storici con i loro edifici in muratura, tra cui anche quelli a valenza storico-monumentale come le chiese, campanili e palazzi.

Le cause principali di quanto avvenuto sono da ricercarsi, da un lato, nelle caratteristiche del moto sismico che ha fornito le maggiori accelerazioni spettrali nell'intervallo di periodi di oscillazione tipici degli edifici in muratura, ovvero periodi piuttosto bassi dovuti all'elevata rigidità che caratterizza queste strutture. Dall'altro, nei fattori di vulnerabilità, o punti di debolezza, evidenziati da questa tipologia costruttiva a seguito di ogni evento sismico di una certa rilevanza.

Da una analisi dei danni rilevati negli edifici è possibile desumere alcune considerazioni di carattere generale.

(i) La scarsa qualità delle murature (fig. 2a), spesso realizzate con materiali scadenti e senza una corretta regola dell'arte (tessitura irregolare dei conci

murari, assenza di diatoni, ecc.), che quindi possono disgregarsi facilmente in presenza di un terremoto anche di non elevata intensità, ha giocato un ruolo fondamentale nell'aumentare i danni agli edifici. È il caso, ad esempio, delle murature in pietrame a sacco, con due paramenti esterni non collegati tra loro che contengono un riempimento di materiale grossolano (fig. 2b).

(ii) Anche la mancanza di adeguati collegamenti tra le pareti e tra pareti e solai è risultata in alcuni casi determinante, favorendo l'attivazione dei cosiddetti *meccanismi di II modo*, ovvero quei meccanismi di collasso locale che conducono al ribaltamento fuori dal piano delle pareti (fig. 3a), invece che all'attivazione del comportamento scatolare o globale dell'edificio, che si sviluppa viceversa con i più sicuri *meccanismi di I modo* che agiscono nel piano della parete.

Nel caso dei meccanismi fuori dal piano si instaura un cinematismo in cui la parte interessata si comporta come un corpo rigido che ruota attorno ad un asse. Nella sua fase incipiente prima del collasso tale meccanismo è ben evidenziato da lesioni di distacco tra le parti in movimento e quelle che invece restano ferme (fig. 8a).

(iii) Talvolta anche gli interventi di consolidamento realizzati in precedenza hanno contribuito ad incrementare la vulnerabilità degli edifici, anziché migliorare il comportamento sismico, perché, pur muovendo da motivazioni valide e condivisibili, non hanno ben valutato gli “effetti collaterali” o altri aspetti, evidentemente non secondari, del comportamento strutturale. A tal riguardo si possono citare, in maniera non certo esaustiva:

- la realizzazione di solai in c.a. in strutture in murature esistenti, che pur avendo il merito di introdurre orizzontamenti rigidi che ben ridistribuiscono le forze sismiche dai maschi “deboli” ai maschi “forti”, hanno anche aumentato in maniera considerevole la massa dell'edificio, e quindi la forza sismica. In alcuni casi (fig. 4a) questo aspetto negativo è risultato molto più importante dell'effetto positivo della migliore redistribuzione delle forze sismiche, conducendo al collasso della struttura, specialmente se le murature non erano di eccellente qualità;
- la realizzazione di cordoli in c.a. in breccia in murature esistenti, che hanno sì legato la muratura agli orizzontamenti, ma la hanno notevolmente indebolita localmente, creando l'innescò della rottura del maschio murario, oltre che, di nuovo, hanno aumentato la massa sismica dell'edificio;
- interventi più recenti, quali ad esempio cordoli in acciaio con perni di collegamento alle murature, che hanno sì risolto il problema dell'aumento di peso e che quindi in generale potevano essere considerati come dei buoni interventi, ma di nuovo si sono rilevati a volte inefficaci a causa della cattiva qualità delle murature sottostanti (fig. 4b), in parte anche aggravata dalle perforazioni realizzate per introdurre i perni.

La sintesi di queste, e altre, osservazioni sul campo è che bisogna anzitutto rinforzare adeguatamente le pareti murarie, con diverse tecniche e a seconda

delle situazioni, e solo successivamente ha senso realizzare altri interventi di consolidamento.

Quando la muratura è di sufficiente qualità, e quando le connessioni risultano adeguate, l'edificio tende ad avere un comportamento globale, o scatolare, che è ulteriormente favorito dalla eventuale regolarità in pianta ed in elevato della struttura. Tale situazione rappresenta la condizione migliore di comportamento per gli edifici in muratura, che si potrebbe anche definire, con la dovuta cautela, ottimale. In tal caso ci si aspetta comunque un possibile danneggiamento della struttura (fig. 3b), ma la possibilità di crollo catastrofico è di regola scongiurata, permettendo la salvaguardia delle vite e del patrimonio contenuti nell'edificio.

In un edificio che risponde globalmente le pareti sono impegnate prevalentemente nel loro piano, attivando meccanismi di collasso che sono più favorevoli in quanto solitamente non inducono crolli e dissipano più energia rispetto ai meccanismi di II modo, e che si suddividono in:

- pressoflessione complanare (fig. 5a);
- taglio con fessurazione diagonale (fig. 5b);
- taglio per scorrimento (fig. 5c).

A seconda del tipo di meccanismo che si innesca, che sarà quello nei confronti del quale la muratura presenta la resistenza minore, si manifestano delle lesioni tipiche, come ad esempio quelle a “X” dovute al taglio per fessurazione diagonale (fig. 3b), lesioni orizzontali dovute al taglio per scorrimento e lesioni verticali nella parte bassa dovute allo schiacciamento. Spesso sono gli elementi più deboli a lesionarsi per primi, quali le fasce di piano, mentre nei casi peggiori è il maschio murario.

Gli edifici monumentali (chiese, campanili, palazzi), nonostante spesso presentino una migliore fattura rispetto alle tradizionali costruzioni muratura, in quanto realizzati con materiali più resistenti e con una maggiore attenzione alla regola dell'arte (conci di pietra squadrati o in laterizi pieni disposti secondo una tessitura regolare e concatenati tra loro), hanno comunque subito danni ingentissimi, principalmente a causa della loro vulnerabilità intrinseca nei confronti delle azioni orizzontali indotte dal sisma.

Per questa tipologia di edifici è alquanto difficile osservare un comportamento di tipo globale, date le complessità morfologiche e costruttive che spesso presentano. L'osservazione dei danni prodotti dai terremoti passati ha infatti evidenziato come gli edifici monumentali, in particolar modo le chiese, forniscono una risposta localizzata ad alcune loro parti, dette *macroelementi* (per esempio la facciata, l'abside, le pareti delle navate laterali, l'arco trionfale, la cupola ecc.), invece che fornire una risposta d'insieme estesa all'intero complesso.

La presenza di murature di buona qualità spesso ha evitato lo sgretolamento delle pareti, e queste si sono comportate alla stregua di un blocco monolitico, dando luogo a meccanismi fuori dal piano (figg. 6a-6b) dovuti principalmente alle notevoli luci delle campate, oltre che all'assenza di adeguate connessioni tra le parti e alla possibile presenza di elementi spingenti (archi e coperture).

Le linee guida sulla “Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M.”, emanate con la Direttiva P.C.M. 9 febbraio 2011, forniscono indicazioni riguardo ai macroelementi di cui si compongono le chiese e i meccanismi che potrebbero attivarsi, con i fattori di vulnerabilità che li favoriscono e i presidi antisismici che invece li scongiurerebbero. Tra le più comuni si hanno:

- ribaltamento della facciata o di una parte di essa, spesso coincidente con il timpano (fig. 6a);
- ribaltamento delle pareti laterali dell’aula (fig. 6b);
- rotazione delle spalle dell’arco di trionfo (arco-piedritto o solo arco);
- rottura della torre e/o della cella campanaria (fig. 7);
- rottura della cupola e/o del tamburo.

2. *La conoscenza come requisito fondamentale*

Conoscere approfonditamente le costruzioni oggetto di valutazione della sicurezza sismica e suscettibili di intervento di consolidamento strutturale è di fondamentale importanza, in quanto una conoscenza approssimata potrebbe portare a valutazioni superficiali e di conseguenza ad interventi errati che potrebbero addirittura peggiorare la risposta strutturale in caso di sisma, come ricordato nel paragrafo precedente. Inoltre, nel caso di edifici a valenza monumentale, bisogna confrontarsi anche con i valori storici e artistici presenti, cercando di preservarli durante il processo di conoscenza, che in alcune fasi può risultare anche invasivo.

Il percorso della conoscenza è costituito da diversi passi successivi che consentono di raggiungere un certo livello di comprensione della costruzione, a seconda dell’approfondimento e dell’estensione delle indagini effettuate. Le fasi salienti sono:

1. *Analisi storico-critica*: per gli edifici storici che hanno una datazione molto antica è importante conoscere le loro vicissitudini per poter determinare se si tratta di costruzioni che hanno subito molti rimaneggiamenti e, quindi, presentano stratificazioni di materiali e tecniche costruttive, oppure di organismi in tutto o in parte simile agli originali. Gli interventi che spesso venivano eseguiti riguardano principalmente l’apertura e la chiusura di vani e nicchie nei maschi murari, il rifacimento di coperture, la demolizione o l’aggiunta di solai. Tutti questi interventi potrebbero aver indebolito e introdotto vulnerabilità locali nella compagine strutturale, ed è quindi necessario identificarli con il maggior grado di accuratezza possibile.
2. *Rilievo geometrico-strutturale*: consente di individuare quali sono le parti che costituiscono lo schema resistente, ovvero l’ossatura muraria vera

e propria, escludendo tutto ciò che non contribuisce alla resistenza nei confronti del terremoto come ad esempio le tramezzature, gli ornamenti, ecc. È inoltre necessario conoscere le dimensioni degli elementi sia per determinare le sezioni resistenti ai carichi statici verticali e alle azioni sismiche orizzontali, che per stabilire l'entità delle masse (e dei pesi) e delle rigidezze in gioco. Conoscere in maniera corretta la massa e la rigidezza della costruzione è molto importante al fine di determinare le forze sismiche attese, in quanto queste sono forze di inerzia che, quindi, dipendono dalla massa e dall'accelerazione spettrale, quest'ultima funzione della pericolosità del sito in cui ricade l'edificio e del periodo di oscillazione dell'edificio dato dalla relazione

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (1)$$

dove m è la massa e k la rigidezza.

Il campanile di Amatrice è proprio grazie alla sua altezza e, di conseguenza, al suo elevato periodo proprio di oscillazione (a cui corrispondono accelerazioni modeste), che è stato uno dei pochi edifici a non crollare dopo la forte scossa che ha raso al suolo quasi tutto il centro storico.

3. *Dettagli costruttivi*: in questa fase si scende più in profondità con le indagini al fine di valutare sia la qualità dei materiali e della tecnica costruttiva utilizzata, quindi la tipologia di conci e malta, la tessitura muraria, la presenza di diatoni nello spessore del muro, la tipologia di orizzontamenti (es. solai in legno, in profilati in acciaio e tavelloni, in laterocemento, volte in pietra o mattoni ecc.), sia la qualità delle connessioni tra pareti e tra pareti e solai, quindi l'entità dell'ammorsamento tra i muri, dell'appoggio dei solai sulle pareti d'ambito e la presenza di cordoli e catene ai vari piani. Alcune indagini che possono risultare utili in questa fase sono la termografia, che consente di distinguere la discontinuità della materia (es. per individuare l'orditura dei solai, vuoti nella muratura), la rimozione dell'intonaco in alcuni punti, endoscopie nello spessore dei muri e degli orizzontamenti per comprenderne la stratigrafia. A parte la termografia, l'uso di queste indagini nel caso di beni con una valenza storico-monumentale è limitato dalla evidente necessità di ridurre al minimo l'invasività, potendo quindi essere indagate solo le zone prive di stucchi, decorazioni e affreschi.

4. *Caratteristiche meccaniche dei materiali*: è la fase più delicata perché comporta necessariamente anche indagini di tipo distruttivo o semi-distruttivo sulla costruzione. I materiali da indagare sono sia quelli che costituiscono l'ossatura portante verticale e orizzontale che il terreno di fondazione, un "materiale" che interagisce con la struttura, la cui conoscenza mediante indagini geognostiche e sismiche (MASW, HVSR) è importante, in quanto le condizioni del terreno possono essere all'origine

di eventuali quadri fessurativi e di fenomeni di amplificazione sismica locale. Le indagini che più frequentemente si effettuano sulle murature sono i martinetti piatti, di tipo “semplice” per determinarne lo stato tensionale e la resistenza a compressione verticale, e di tipo “doppio” per determinarne anche lo stato deformativo e il modulo elastico. Più raramente si effettuano prove in situ di taglio diretto, di compressione diagonale e di taglio-compressione su pannelli murari, in quanto sono molto invasive richiedendo la rimozione di una porzione significativa di parete, con conseguente indebolimento della stessa. In certe condizioni favorevoli sono possibili anche carotaggi con relative prove di rottura in laboratorio. Per determinare le proprietà meccaniche delle malte in situ spesso si utilizzano penetrometri e sclerometri che ne valutano la consistenza. Conoscere approfonditamente le caratteristiche della malta che costituisce i giunti è molto importante, in quanto ad essa è demandato il compito di legare insieme i singoli conci murari in modo che la parete si comporti in maniera più unitaria possibile.

5. *Quadro fessurativo e degrado*: permette di determinare lo stato di salute dell'edificio sia nei confronti dei carichi di natura statica che dinamica, in quanto, se presente, può ridurre notevolmente la capacità portante della struttura. La presenza di lesioni pregresse può essere dovuta a diverse cause, come alla ridotta capacità dell'elemento strutturale rispetto alle sollecitazioni cui è stato sottoposto, all'attivazione di un meccanismo di collasso locale non del tutto sviluppato durante un passato terremoto, a cedimenti fondali in corso, ecc. Ad esempio in fig. 8a è visibile una lesione verticale tra la facciata e la parete laterale, significativa dell'innescò di un meccanismo di ribaltamento della facciata che per fortuna non è giunto a termine; in questo caso l'inserimento di una o più catene a contrasto del ribaltamento sarebbe sicuramente efficace.

Al termine del percorso di conoscenza è necessario sintetizzare tutte le informazioni ottenute in un livello di conoscenza globale (LC) e tradurle in un dato quantitativo, il fattore di confidenza FC, da utilizzarsi come fattore riduttivo delle resistenze della muratura nel momento in cui si effettuano le verifiche di sicurezza sugli elementi resistenti a valle dell'analisi strutturale.

Per gli edifici ordinari la normativa tecnica codifica 3 livelli di conoscenza:

- LC 1: basso, cui corrisponde $FC = 1.35$
- LC 2: esteso, cui corrisponde $FC = 1.20$
- LC 3: esaustivo, cui corrisponde $FC = 1.00$

per ognuno dei quali definisce il tipo e la quantità di indagini da effettuarsi.

Spesso si preferisce ridurre al minimo le indagini conoscitive per risparmiare sui costi, ma va segnalato che un limitato livello di conoscenza (es. LC 1) può portare poi a dover sostenere costi molto maggiori per gli interventi da eseguirsi al fine di raggiungere il miglioramento o l'adeguamento sismico.

La Direttiva P.C.M. 9 febbraio 2011 fornisce indicazioni alternative al D.M.

14 gennaio 2008 “Norme tecniche per le costruzioni” per il calcolo del fattore di confidenza nel caso dei beni culturali,

$$FC = 1 + \sum_{k=1}^4 F_{ck}, \quad (2)$$

in cui i valori dei termini F_{ck} sono associati a quattro categorie di indagine previste (rilievo geometrico, identificazione delle specificità storiche e costruttive, proprietà meccaniche dei materiali, terreno e fondazioni) ed ai relativi livelli di conoscenza raggiunti. In ogni caso FC sarà sempre compreso tra 1 e 1.35.

3. *Metodi per la valutazione della vulnerabilità sismica*

La valutazione della vulnerabilità sismica è una procedura che consente di determinare il livello di sicurezza (o di rischio) della costruzione rispetto ad un obiettivo prestazionale.

Esistono diversi metodi per la valutazione della vulnerabilità/capacità delle costruzioni in muratura, e la scelta di uno in luogo di un altro dipende essenzialmente dalla scala della valutazione e dal livello di affidabilità dei risultati che si vogliono ottenere. In particolare è possibile distinguere tra metodi speditivi, per valutazioni celeri su larga scala o tipo comparativo tra gli edifici, e metodi analitici, per valutazioni di dettaglio sul singolo o su pochi edifici.

3.1 *Metodi speditivi*

Consentono la valutazione di molti edifici, anche a scala urbana, con un dispendio di risorse e un onere computazionale molto ridotti. Si basano sulla conoscenza di pochi elementi essenziali e servono a definire una scala di vulnerabilità tra i vari edifici analizzati o degli scenari di danno atteso per determinati eventi sismici.

Tra questi si annoverano il metodo macrosismico e il metodo dell'indice di vulnerabilità. Il primo si basa sulla scala macrosismica europea EMS 98 e consiste nell'individuare la tipologia di sistema resistente verticale e orizzontale tra alcune proposte, cui viene associata una classe di vulnerabilità più probabile (da A a F) dalla quale si ottengono le curve di vulnerabilità che consentono di determinare il danno medio atteso in funzione dell'intensità macrosismica. Note le curve di vulnerabilità per ciascuna tipologia valutata, è poi possibile riprodurre scenari di danno su larga scala fissando uno o più eventi sismici di una certa intensità, magari scegliendo quest'ultima sulla base dei dati storici della sismicità dell'area di interesse.

Il *metodo dell'indice di vulnerabilità* è più laborioso in quanto prevede che venga calcolato un indice come somma di punteggi da assegnare, mediante

giudizio esperto, ad alcuni fattori di vulnerabilità e/o presidi antisismici presenti nella costruzione. Tuttavia resta un metodo veloce da applicare quando si debbano valutare molti edifici appartenenti ad una medesima tipologia strutturale, di cui se ne vuole stilare una graduatoria di vulnerabilità e, quindi, capire quali edifici richiedono interventi prioritari.

In letteratura esistono diversi metodi dell'indice di vulnerabilità, ciascuno calibrato appositamente per una determinata tipologia strutturale, oppure per valutare aggregati edilizi o interi centri storici. Anche la Direttiva P.C.M. 9 febbraio 2011 prevede una valutazione semplificata della vulnerabilità delle chiese mediante il metodo dell'indice di vulnerabilità, considerando 28 possibili meccanismi di danno associati ai diversi macroelementi che possono essere presenti nelle chiese.

La vulnerabilità globale dell'intero edificio è data da un indice di vulnerabilità Iv , compreso tra 0 e 1, definito come media pesata del comportamento delle diverse parti:

$$Iv = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2} \quad (3)$$

dove v_{ki} e v_{kp} sono, rispettivamente, il punteggio ottenuto dal rilievo degli indicatori di vulnerabilità e dei presidi antisismici per il k -esimo meccanismo di danno, mentre ρ_k è il peso assegnato a ciascun meccanismo (0 nel caso di assenza del macroelemento per cui si sarebbe potuto attivare il meccanismo, mentre è compreso tra 0.5 e 1 negli altri casi).

3.2 Metodi meccanici

Sono i metodi della Scienza e della Tecnica delle Costruzioni, ripresi dal D.M. 14 gennaio 2008 (le cosiddette Norme Tecniche per le Costruzioni), e consistono nella modellazione del comportamento meccanico dei materiali e degli elementi strutturali, nell'esecuzione di analisi strutturali e nelle verifiche di sicurezza nei confronti sia dei meccanismi di tipo globale che di tipo locale.

La valutazione della sicurezza per gli edifici in muratura può essere effettuata facendo riferimento al solo stato limite ultimo (SLU), in quanto le valutazioni rispetto agli stati limite di esercizio (SLE) si ritengono automaticamente soddisfatte per l'elevata rigidità che usualmente hanno le costruzioni in muratura che, quindi, esibiscono spostamenti ridotti. Qualora invece si tratta di edifici che rivestono importanza strategica nella gestione delle emergenze, come nel caso delle caserme e degli ospedali, bisogna valutare tutti gli stati limite.

Il risultato finale che scaturisce dalle verifiche di sicurezza è l'indicatore (o indice) di rischio sismico $I_{R,SL}$ riferito ad uno specifico stato limite, dato dal rapporto tra la capacità strutturale e la domanda indotta dal sisma, in termini di forze/accelerazioni o spostamenti a seconda del tipo di analisi che si è eseguita.

Usualmente l'indicatore di rischio sismico è espresso in termini di accelerazione di picco al suolo (PGA) o di tempo di ritorno (T_R):

$$I_{R,SL} = \left(\frac{PGA_C}{PGA_D} \right), \quad I_{R,SL} = \left(\frac{T_{R,C}}{T_{R,D}} \right)^{0.41}, \quad (4)$$

dove PGA_C e $T_{R,C}$ rappresentano i valori di capacità per cui si raggiunge lo stato limite considerato e PGA_D e $T_{R,D}$ i valori di domanda per il medesimo stato limite. L'esponente 0.41 nella seconda delle (4) permette di comparare i valori ottenuti dalle due formule alternative.

Un valore di $I_{R,SL}$ minore di 1 indica che la verifica non è soddisfatta e, quindi, che la struttura non ha il grado di sicurezza richiesto dalla normativa per gli edifici di nuova costruzione. Questo fatto, che accade sistematicamente negli edifici esistenti, non vuol tuttavia dire che l'edificio non ha comunque un margine di sicurezza rispetto a determinati terremoti, ma solo che questo margine è minore di quello che sia ha per edifici di nuova costruzione.

4. *Analisi globali*

Riguardano l'intero edificio e consistono nell'esecuzione di analisi strutturali, di tipo lineare o non lineare e di natura statica o dinamica, e di verifiche di sicurezza sugli elementi resistenti quali maschi murari, fasce di piano, archi, volte ecc. rispetto alle sollecitazioni agenti in condizioni statiche e sismiche. Come ricordato nei capitoli precedenti, ha senso effettuare questo tipo di analisi solo quando è garantita una adeguata qualità muraria (tale da evitare lo sgretolamento delle murature) e quando è scongiurato qualsiasi meccanismo locale.

Il D.M. 14 gennaio 2008 prevede, per gli edifici in muratura, che è sempre possibile ricorrere a metodi di analisi non lineari qualunque sia il livello di conoscenza acquisito, cosa che invece non è consentita per gli edifici esistenti in calcestruzzo. Inoltre, è possibile eseguire l'analisi statica non lineare (pushover) anche quando la massa partecipante del modo fondamentale è bassa.

Nel caso di comportamento globale si pone il problema di modellare adeguatamente la struttura, cosa non immediata data l'eterogeneità dei materiali (pietrame, laterizio, tipi di malte), dei pannelli murari (piena a una o più teste, a sacco, a pannelli murari accostati) e delle tecniche costruttive (tipologia di orizzontamento come solai in legno, in laterocemento, sistemi voltati ecc.) che spesso si riscontrano anche all'interno di uno stesso edificio.

In ordine crescente di difficoltà e di accuratezza, i modelli che possono essere usati per prevedere il comportamento delle strutture in muratura sono:

- *Telaio equivalente* (fig. 9a): l'ossatura muraria portante viene schematizzata come un classico telaio costituito da elementi unidimensionale (travi, che

saranno necessariamente tozze), in cui i maschi murari sono gli elementi verticali, mentre le fasce di piano sono gli elementi orizzontali che collegano i maschi tra loro, con un grado di incastro variabile a seconda delle caratteristiche geometriche e di resistenza delle fasce stesse. Le zone di intersezione tra i maschi e le fasce in muratura sono assunte infinitamente rigide, mentre nelle altre zone, assunte deformabili, viene concentrata la capacità dissipativa in campo non lineare. È la tecnica di modellazione più semplice e meno onerosa dal punto di vista computazionale, per questo è la più usata nella pratica professionale.

- *Metodo agli elementi finiti - FEM* (fig. 9b): il FEM consente di effettuare la modellazione al continuo di tutte le parti della costruzione muraria (pareti, archi, volte, ecc.) riducendo al minimo le semplificazioni geometriche. Solitamente si ricorre ad elementi 2D, come le lastre o piastre, o 3D, come gli elementi solidi, opportunamente discretizzati in mesh. In questo caso la capacità dissipativa post elastica è diffusa a tutto il modello e può essere riprodotto, con sufficiente accuratezza, l'evolversi dello stato fessurativo durante un evento sismico. Data la maggiore complessità nella modellazione e il maggiore onere computazionale, è ancora usato principalmente nella ricerca ma già pronto per essere usato nella pratica professionale, dove viene impiegato in casi di grande rilevanza come gli edifici monumentali.
- *Metodo agli elementi discreti - DEM* (fig. 9c): si tratta di una modellazione di tipo discreto, in cui il modello strutturale è costituito da blocchi rigidi o deformabili che interagiscono mediante opportuni legami costitutivi nelle zone di contatto. Consente di analizzare l'evoluzione della risposta strutturale, mediante aggiornamento sequenziale della posizione relativa dei blocchi, sia per quanto concerne la qualità dell'equilibrio (instabilità, condizione limite) che relativamente ai fenomeni di rottura, indagando anche la propagazione della frattura grazie alla possibilità di raggiungere grandi spostamenti. È la tecnica computazionalmente più onerosa da realizzare, per questo ancora confinata al mondo della ricerca.

5. *Analisi dei meccanismi locali*

I meccanismi locali possono essere analizzati mediante i metodi dell'*analisi limite*, che prevedono il collasso per perdita di equilibrio anziché per raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali. Infatti, la debole resistenza a trazione della muratura porta, in questi casi, ad un collasso la cui valutazione non dipende in modo significativo dalla deformabilità della struttura, ma piuttosto dalla sua geometria, dalle condizioni di vincolo e dai carichi agenti. Queste condizioni influenzano il tipo di meccanismo che può

attivarsi, per cui è necessario analizzarle attentamente al fine di poter valutare nel modo più realistico possibile il livello di sicurezza della struttura.

Nella sua versione semplice (e quindi più usata nella pratica professionale) l'analisi limite si basa sulle seguenti ipotesi:

- resistenza nulla a trazione;
- infinita resistenza a compressione (ipotesi che può essere rimossa assumendo la reale resistenza a compressione della muratura);
- deformabilità elastica trascurabile (ipotesi di corpo rigido);
- assenza di scorrimento tra i blocchi.

L'analisi può essere eseguita secondo il metodo cinematico lineare, il quale consiste nel determinare il moltiplicatore α_0 (per esempio mediante il Principio dei Lavori Virtuali, in cui si eguaglia il lavoro fatto dalle forze esterne con quello fatto dalle forze interne) che applicato alle forze inerziali produce la perdita dell'equilibrio. Noto α_0 è possibile calcolare l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo mediante l'espressione

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 \cdot g}{FC \cdot e^*}, \quad (5)$$

dove:

- g è l'accelerazione di gravità;
- $e^* = g \frac{M^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i}$ è la frazione di massa partecipante del meccanismo in esame, in cui M^* è la massa partecipante e P_i sono le forze peso coinvolte nel cinematismo;
- FC è il fattore di confidenza. Nel caso in cui per la valutazione del moltiplicatore non si tenga conto della resistenza a compressione della muratura, il fattore di confidenza da utilizzare sarà comunque quello relativo al livello di conoscenza LC1.

L'accelerazione di attivazione del meccanismo così calcolata deve essere confrontata con l'accelerazione di riferimento al sito, e deve risultare:

$$a_0^* \geq \frac{a_g(P_{VR}) \cdot S}{q} \quad (6)$$

in cui:

- $a_g(P_{VR})$ è l'accelerazione attesa su suolo rigido orizzontale con una probabilità di superamento (P_{VR}) nel periodo di riferimento (V_R);
- S è il coefficiente che tiene conto degli effetti amplificativi di sito;
- q è il fattore di struttura, solitamente assunto pari a 2.

È da precisare che bisogna valutare tutti i possibili meccanismi individuati nella fabbrica e il coefficiente di sicurezza sarà il più basso tra quelli ottenuti.

6. *Tecniche di intervento per il consolidamento strutturale*

In questo momento storico, in cui ci si appresta ancora una volta ad intraprendere la ricostruzione del nostro patrimonio gravemente danneggiato dal sisma del Centro Italia, assume fondamentale importanza la modalità con cui saranno concepiti ed eseguiti gli interventi di consolidamento strutturale, in quanto dalla buona riuscita di questi dipenderà la capacità del costruito storico di resistere a forti terremoti che si potrebbero verificare in futuro, in una zona che ormai sappiamo essere da alta pericolosità sismica.

Per quanto riguarda il rinforzo delle murature, negli ultimi anni si sta imponendo sempre più il ricorso a tecniche di intervento che utilizzano i materiali compositi fibrorinforzati, i quali combinano fibre o tessuti di un certo materiale (carbonio, vetro, aramide, basalto, ecc.) con una matrice polimerica (FRP) o cementizia (FRCM) che funge da collante. Questi consentono interventi leggeri (senza ulteriore apporto di masse sismiche), rapidi ed efficienti, grazie soprattutto alle ottime prestazioni meccaniche delle fibre.

Molto importante, se si pensa alla conservazione degli edifici a carattere monumentale, è anche la ridotta invasività con cui possono essere applicati i materiali compositi e la reversibilità dell'intervento.

In tutti i casi di cattiva qualità muraria gli interventi devono essere volti essenzialmente a conferire un comportamento il più possibile monolitico alla parete. Ciò può essere ottenuto mediante diverse tecniche, di diversa efficacia e da applicarsi a seconda dei casi, tra le quali si possono citare, in maniera non esaustiva:

- iniezioni di malte cementizie o di resine all'interno della parete per riempire le cavità tra i conci di pietra;
- scuci e cucì per regolarizzare la tessitura muraria ove è fortemente irregolare, ovvero per sostituire elementi danneggiati;
- inserimento di connettori trasversali (diatoni) per collegare i paramenti murari qualora semplicemente accostati;
- ristilatura armata dei giunti, mediante inserimento di barre o fili nei letti di malta;
- intonaco armato leggero, consistente nell'applicazione di una sottile rete (per esempio in composito) sulle due superfici della parete, con opportune connessioni attraverso lo spessore del muro;
- cucitura delle pareti mediante opportuni cavi, di diverso materiale, inseriti in fori passanti sulla muratura, aventi lo scopo di "impacchettare" il paramento murario di bassa qualità strutturale senza l'invasività dell'intonaco armato.

Questi interventi incrementano anche le capacità della parete nei confronti delle sollecitazioni di pressoflessione e taglio, per i quali tuttavia è possibile prevedere interventi specifici applicando nastri FRP/FRCM sulle superfici murarie, orientandoli in maniera differente a seconda di quale meccanismo

si vuole incrementare la capacità (anche più di uno contemporaneamente). Nel caso della pressoflessione i nastri sono disposti a bande verticali su tutta l'altezza del muro, spesso accoppiati con nastri disposti a bande orizzontali per contrastare anche la sollecitazione di taglio mediante l'instaurarsi di un meccanismo a traliccio.

Qualora invece non si effettui il rinforzo a pressoflessione, i nastri per contrastare il taglio vengono disposti a "X" sui due lati delle pareti murarie oggetto di intervento.

In ultimo, per evitare l'innesco dei meccanismi fuori dal piano risultano ancora efficaci i tradizionali interventi che prevedono l'installazione di tiranti (catene) a ritegno delle facciate o di connettori inseriti lungo il perimetro dei solai e ripiegati nella muratura sottostante. Alternativamente si può ricorrere alla tecnica della cerchiatura con nastri in FRP che avvolgono l'intero edificio a livello degli orizzontamenti, la quale, a differenza della catena o dei connettori, garantisce un'azione di tenuta distribuita in maniera continua, evitando così i fenomeni di punzonamento dei capochiave sulla muratura che talvolta vanificano l'efficacia dei tiranti.

La connessione tra pareti ortogonali non ben ammorsate può essere migliorata mediante l'applicazione di reti FRP lungo gli spigoli degli incroci murari, garantendo sempre un contrasto con la faccia opposta a quella su cui è applicata mediante connettori disposti nello spessore del muro ad intervalli regolari ed ancorati sulle due superfici murarie.

Appendice

Fig. 1. Viste della parte storica di Amatrice rasa al suolo dal sisma del 24.08.2016



Fig. 2a-2b. Disgregazione delle murature di qualità scadente, costituite da ciottoli e da malte molto povere



Fig. 3a-3b. Comportamento locale vs comportamento globale



Fig. 4a-4b. Esempi di interventi che si sono rivelati deleteri nel recente sisma del Centro Italia

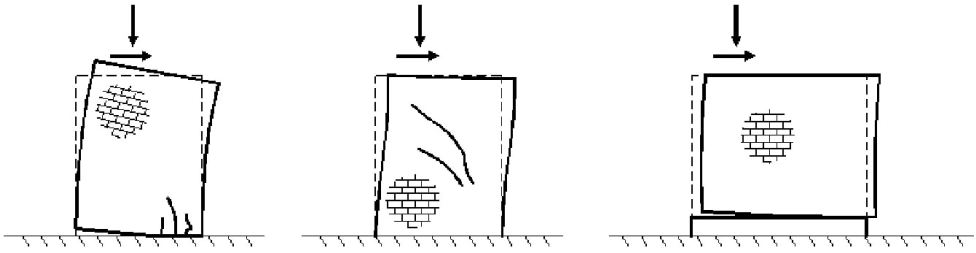


Fig. 5a-5b-5c. Meccanismi di collasso nel piano della parete



Fig. 6a. Ribaltamento del timpano di una chiesa a Camerino; 6b. Ribaltamento delle pareti laterali della cattedrale di Norcia



Fig. 7. Rottura della cella campanaria

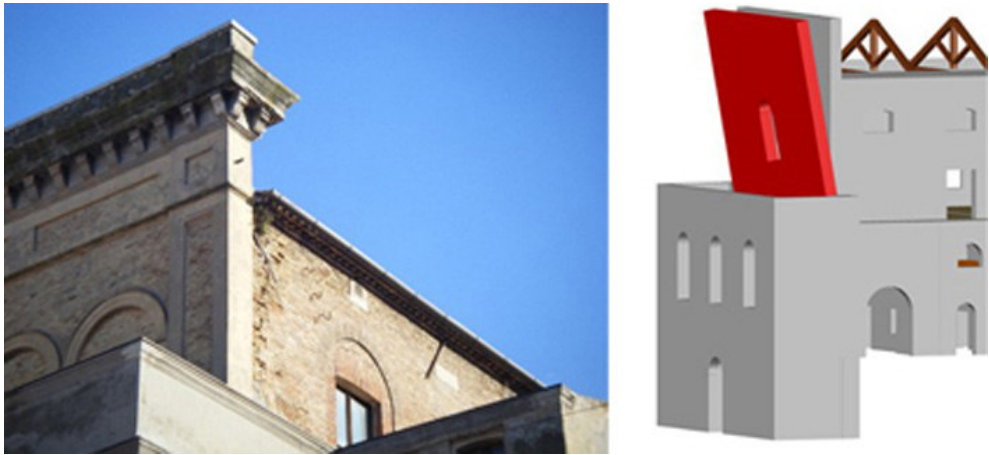


Fig. 8a. Lesione verticale tra facciata e parete laterale; 8b. Meccanismo di ribaltamento della facciata superiore



Fig. 9. Modelli per il comportamento meccanico delle pareti murarie: a) modello a telaio equivalente dell'ex chiesa di San Francesco ad Alto, Ancona; b) modello FEM con elementi solidi della Basilica di Sant'Apollinare in classe, Ravenna; c) modello DEM della torre campanaria del Duomo di San Ciriaco, Ancona

JOURNAL OF THE SECTION OF CULTURAL HERITAGE

Department of Education, Cultural Heritage and Tourism
University of Macerata

Direttore / Editor

Massimo Montella

Co-Direttori / Co-Editors

Tommy D. Andersson, University of Gothenburg, Svezia

Elio Borgonovi, Università Bocconi di Milano

Rosanna Cioffi, Seconda Università di Napoli

Stefano Della Torre, Politecnico di Milano

Michela di Macco, Università di Roma "La Sapienza"

Daniele Manacorda, Università degli Studi di Roma Tre

Serge Noiret, European University Institute

Tonino Pencarelli, Università di Urbino "Carlo Bo"

Angelo R. Pupino, Università degli Studi di Napoli L'Orientale

Girolamo Scullo, Università di Bologna

Texts by

Caterina Barilaro, Cristiano Bedin, Matteo Bertelé, Valentina Bucci,

Francesco Clementi, Delio Colangelo, Annalisa Colecchia, Gabriele Costa,

Serena D'Orazio, Daniela De Liso, Carlo Dionisotti, Patrizia Dragoni,

Francesca Favaro, Concetta Ferrara, Maria Teresa Gigliozzi, Rita Ladogana,

Stefano Lenci, Sara Lorenzetti, Agnese Marasca, Valeria Merola,

Pardo Antonio Mezzapelle, Nora Moll, Massimo Montella,

Francesco Montuori, Antonella Negri, Paola Nigro, Antonella Nonnis,

Pietro Petrarola, Dalibor Prančević, Francesca Pulcini,

Federia Maria Chiara Santagati, Mauro Sarnelli, Carlo Serafini, Valentina Valerio

<http://riviste.unimc.it/index.php/cap-cult/index>

