

Building and Construction for Engineers

L'Edilizia

SPECIALE SISMICA
NUOVE NORME TECNICHE

N. 160 L. A. / S. anno XXI - Spedizione in a.p. - 45% - art. 2 comma 101 - D.L. 358/2003 - Conv. in L. 28/2/2004 - n. 46

deLetteraeEditore

EDIFICI IN MURATURA E SICUREZZA SISMICA

Benedetto Romano


Dip. Storia e Progetto nell'Architettura
Università degli Studi di Palermo
ingb.romano@virgilio.it

Masonry historic buildings and seismic safety. Collapse mechanisms of the façade walls according to the current legislation

The paper presents a procedure aimed at the evaluation of seismic safety of masonry historic buildings subjected to earthquakes. The approach chosen is based on a failure analysis of the structures through the identification of the two most ordinary out of plane collapse mechanisms of the façade walls (vertical overturning and overturning with side wings) and calculation of their associated failure factors according to the current legislation in Italy.

First mechanism refers to the overturning of the façade without the participation of the party walls and this usually occurs when there is not a connection at the edges of the wall, or this one is rather poor, due to the geometric dimensions of the connecting elements.

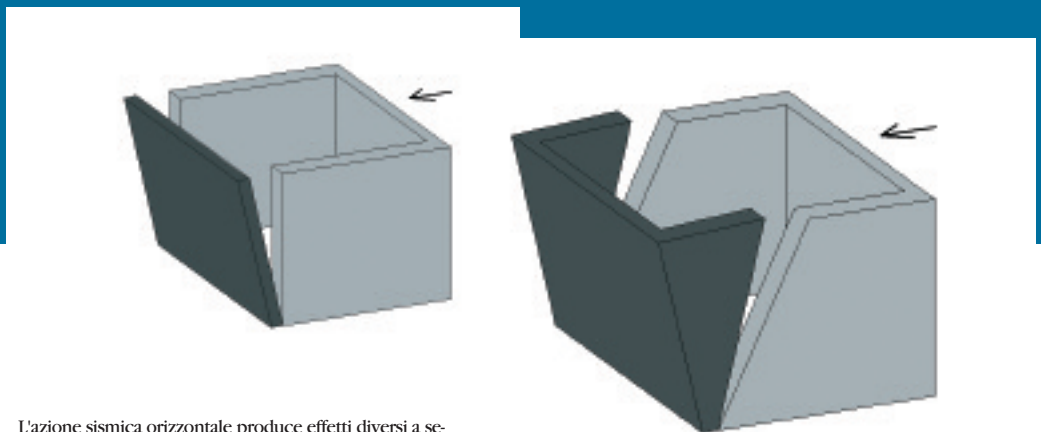
Second mechanism occurs instead of first one when the level of connection is sufficient to involve respectively one or both the party walls into the overturning. The mechanism develops by the occurrence of a diagonal crack along the party wall and an horizontal hinge on the façade



I meccanismi di collasso delle pareti di facciata alla luce della normativa vigente

La costruzione in muratura è un organismo complesso e difficilmente inquadrabile come assemblaggio di elementi strutturali, approccio che invece è naturale per le moderne costruzioni intelaiate in calcestruzzo armato o in acciaio, costituite da elementi monodimensionali (travi e pilastri); tuttavia in molti casi è possibile riconoscere nel manufatto uno schema strutturale dato dalla composizione di pareti, realizzate in muratura e assimilabili ad elementi bidimensionali, cioè a lastre il cui piano medio è disposto verticalmente e nelle quali una dimensione, lo spessore, è sensibilmente minore delle altre due. Tali elementi sono generalmente sollecitati da tensioni verticali di compressione, cui si sovrappongono stati bidimensionali nel piano della parete, in vicinanza delle aperture o di carichi concentrati, e sollecitazioni di flessione, se vi sono spinte orizzontali dovute, ad esempio, alla presenza di archi o volte. L'azione sismica orizzontale produce effetti diversi a seconda che investa le pareti ortogonalmente al loro piano medio o nel proprio piano. Gran parte del patrimonio storico, soprattutto quello definito edilizia minore, ha subito nei secoli grandi cambiamenti, in parte dovuti ad incrementi della costruzione, passando da edifici isolati a schiere, ad aggregati complessi, in parte dovuti a ricostruzioni in zona sismica per riparare crolli causati dal terremoto. Di queste opere è difficile non solo ritrovare il sistema originale, ma anche scoprire il comportamento strutturale.

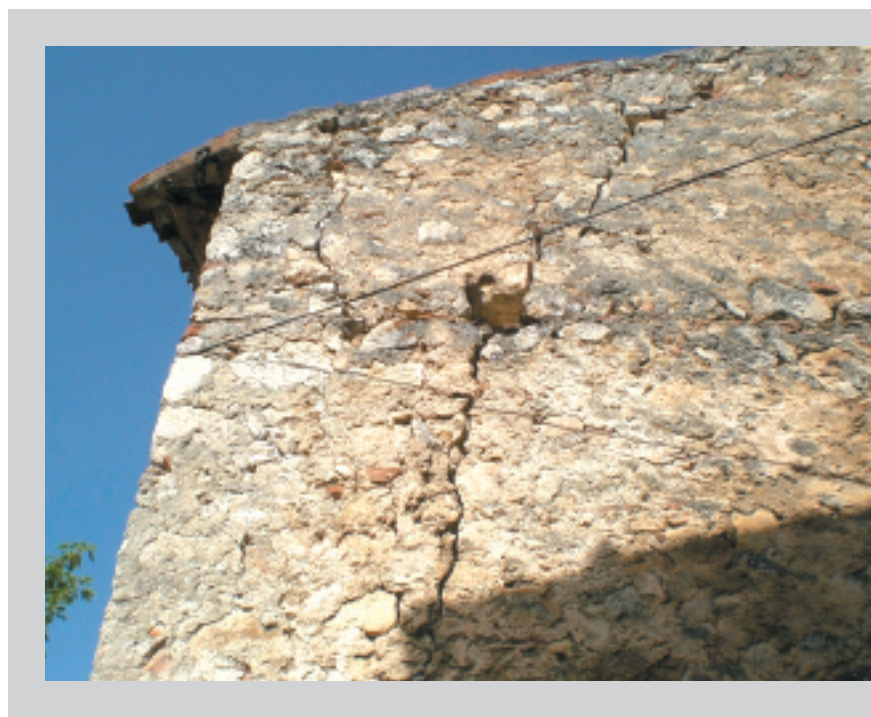
Negli ultimi anni il quadro normativo di riferimento in campo sismico in Italia si è notevolmente modificato. Le modifiche hanno riguardato sia l'estensione dei territori sottoposti alla normativa sismica, sia l'incremento delle azioni prevedibili in numerosi comuni per effetto di un'estesa riclassificazione sismica, sia infine la differente definizione delle azioni sismiche e le diverse modalità da utilizzare per la verifica delle strutture sottoposte ad azioni sismiche. La conseguenza immediata di tali modifiche è che larga parte del patrimonio edilizio nazionale si trova nella condizione di non essere adeguato agli standard di sicurezza minimi definiti dalle normative sismiche sia per effetto della nuova o diversa classificazione, sia per effetto della data di edificazione, spesso antecedente alla precedente dichiarazione di sismicità avvenuta nell'ultimo quarto del ventesimo secolo a seguito degli eventi sismici rilevanti intervenuti in quegli anni. Uno dei concetti di primaria importanza nel campo dell'analisi sismica delle strutture è quello della vulnerabilità, che consiste nella valutazione della maggiore o minore propensione della struttura stessa a subire danni per effetto di un terremoto di assegnate caratteristiche. La valutazione quantitativa della vulnerabilità sismica di un manufatto edilizio in muratura viene sviluppata attraverso l'analisi limite di alcuni elementi strutturali che dalle indagini svolte mostrano carenze di natura costruttiva e scarse capacità meccaniche. In un organismo ar-



L'azione sismica orizzontale produce effetti diversi a seconda che investa le pareti ortogonalmente al loro piano medio o nel proprio piano

chitettonico murario gli elementi strutturali più deboli sono generalmente le pareti di facciata, sottoposte all'azione sismica ortogonale al proprio piano, le quali sono soggette al ribaltamento fuori dal piano stesso. La pratica corrente in Italia è di tenere conto di un limitato numero di meccanismi di collasso; il "collasso" è definito dalle Norme tecniche per le costruzioni, D.M. 14/01/2008, in vigore dal 1° luglio scorso, come *il superamento di uno stato limite ultimo e ha carattere irreversibile*. La possibilità di previsione del danno è legata alla conoscenza del più alto numero di possibili meccanismi di progressivo deterioramento o improvviso collasso, meccanismi che possono essere nel piano (come ad esempio l'effetto dell'azione di ribaltamento nel piano) o fuori dal piano (come ad esempio il ribaltamento di una facciata o di un angolo o lo schiacciamento della muratura). L'interpretazione dei meccanismi di danno o di collasso nel caso di grandi complessi di edifici è particolarmente difficile. Dall'analisi stratigrafica e dall'individuazione di differenti blocchi omogenei, generalmente caratterizzati da una regolarità in altezza, si può procedere a un'ulteriore decomposizione della costruzione. La risposta di queste parti dell'edificio può essere considerata indipendente sotto l'azione sismica e caratterizzata da meccanismi di collasso individuali. Solitamente gli edifici posizionati alle estremità libere di una cortina o di un aggregato sono meno compressi e perciò più severamente danneggiati, con crolli locali e grandi lesioni. Quando i crolli si presentano nella parte interna di un complesso essi interessano generalmente le unità costruttive non riparate, adiacenti a quelle riparate. Il parametro significativo che descrive i modelli di cinematiso nell'analisi di vulnerabilità è il coefficiente di collasso λ che corrisponde al moltiplicatore delle masse sismiche che caratterizza il limite delle condizioni di equilibrio per il singolo elemento strutturale considerato.

Un abaco di tutti i possibili meccanismi di collasso può essere adottato rifacendosi alla nomenclatura usata da una procedura numerica chiamata "FaMIVE" (Valutazione della vulnerabilità e identificazione dei meccanismi di collasso)¹. Tale procedura è stata sviluppata e usata per valutare la comparsa di meccanismi di collasso nei centri storici in regioni sismiche, e individua complessivamente 14 cinematisi (fuori e dentro il piano), come il ribaltamento verticale di facciata, il crollo d'angolo, l'arco verticale, il collasso nel piano, ecc.



Il buon comportamento di una costruzione in muratura sotto sisma si esplica attraverso il raggiungimento di un funzionamento scatolare: la capacità di resistere alle azioni orizzontali deve essere affidata ad un sistema di pareti verticali (di taglio) disposte nelle due direzioni principali della pianta dell'edificio. Attraverso idonei collegamenti tra di esse e con i solai e la copertura possono essere ridotti i meccanismi di ribaltamento fuori del piano delle pareti e deve essere consentita una partecipazione d'insieme dei setti murari nella risposta sismica.

Il criterio su cui sono fondate le verifiche relative ai più probabili meccanismi di danno risiede nella consapevolezza che il collasso della struttura muraria avviene per perdita dell'equilibrio di porzioni strutturali piuttosto che per superamento delle tensioni limite. L'analisi è pertanto rivolta sempre all'individuazione delle condizioni di equilibrio e alla valutazione del massimo valore dell'azione sismica che lo soddisfa.²

L'osservazione sistematica dei danni ad edifici in

muratura ha evidenziato come l'azione sismica determina il collasso di una parete attraverso due modi elementari di danneggiamento: "primo modo" di danno (ribaltamento) e "secondo modo" di danno (rottura a taglio).³

I meccanismi "di primo modo" sono generalmente i più frequenti e si manifestano quando le pareti non sono efficacemente connesse con quelle trasversali nei cantonali e nei martelli, se sono assenti le catene a livello degli orizzontamenti e i solai sono semplicemente appoggiati. Il ribaltamento avviene tramite la creazione di cerniere cilindriche al piede dei maschi murari e delle relative riseghe. Tale meccanismo si verifica in modo sistematico in occasione di terremoti violenti e frequentemente progredisce fino al crollo completo della parete,

una volta venute meno le condizioni di equilibrio. Nel caso di murature scadenti e pareti male ammassate e non collegate, tale meccanismo si verifica anche in occasione di eventi sismici di modesta intensità, come è avvenuto in diversi casi di edifici colpiti dal terremoto in Abruzzo dello scorso aprile.

I meccanismi "di secondo modo", conosciuti anche col nome di meccanismi "di ribaltamento composto", invece, si manifestano quando le pareti sono efficacemente connesse con quelle trasversali che pertanto risultano sollecitate nel loro piano e si creano cerniere cilindriche al piede dei maschi murari e delle relative riseghe con il ribaltamento dell'intera parete insieme a porzioni di paramenti murari trasversali. La dimensione del cuneo di distacco dipende dalla qualità muraria delle pareti di controvento, dalla presenza di aperture e dalla loro posizione.

In assenza di aperture l'ampiezza d'angolo varia tra 15° e 30° in funzione della qualità muraria, per cui più piccola è la porzione di muratura che viene trascinata nel ribaltamento, minore è l'effetto stabilizzante.⁴ Il cinematismo per un'azione nel piano si attiva per un livello superiore dell'azione sismica, quando sono efficaci i collegamenti, e solo in casi estremi porta al collasso della parete stessa, in

quanto in condizioni dinamiche presenta un comportamento duttile e significative dissipazioni per la presenza dell'attrito che contrasta gli scorrimenti tra gli elementi. A differenza del primo modo, che ha come principale causa la mancanza di connessioni, il secondo modo è condizionato prevalentemente dalla resistenza meccanica della muratura. A tali cinematismi corrispondono stati di sollecitazione differenti sul materiale muratura. Nel caso di meccanismi di primo modo, l'azione flettente che induce il ribaltamento porta ad un aumento dello sforzo di compressione su uno dei due lembi della parete (con conseguente riduzione sull'altro), determinando pertanto la conseguenza di potere innescare i meccanismi di collasso per schiacciamento.

Nel caso di meccanismi di secondo modo, allo sforzo di compressione si aggiunge una sollecitazione di taglio nel piano orizzontale, che interessa i giunti di malta o di contatto tra gli elementi lapidei. Si attivano quindi meccanismi di scorrimento contrastati dall'attrito; perché si evolva il danneggiamento è quindi necessario che i piani di scorrimento colleghino, attraverso lesioni, possibili giunti verticali, fino a formare un'unica lesione ad andamento diagonale o a scaletta.

L'individuazione dei possibili cinematismi e del livello dell'azione sismica che li attiva non è facilmente deducibile da analisi strutturali con gli odierni strumenti di calcolo automatico (metodo agli elementi finiti), anche se condotte a livello sofisticato nella descrizione della geometria e dei materiali. Pertanto risulta di grande importanza utilizzare metodi semplificati, il cui risultato fornisce una più chiara interpretazione qualitativa al progettista. La normativa italiana prevede la possibilità di ricondurre l'azione sismica a forze statiche equivalenti dirette orizzontalmente, il cui valore è proporzionale al peso della costruzione attraverso un coefficiente sismico che dipende dall'accelerazione massima al suolo e dall'amplificazione dinamica, attraverso lo spettro di risposta. Preso in considerazione un meccanismo di collasso è quindi possibile studiare la risposta sismica attraverso un approccio statico, identificando il moltiplicatore orizzontale dei carichi λ , che attiva la condizione limite di perdita dell'equilibrio. La definizione di meccanismo di collasso presuppone la trasformazione dell'elemento murario in un cinematismo. La normativa di riferimento per l'analisi dei meccanismi locali di collasso in edifici esistenti in muratura



è l'O.P.C.M. n. 3274/2003, così come modificata dall'O.P.C.M. 3431/2005. Secondo quanto prescrive l'Allegato 11.C la verifica di sicurezza degli edifici in muratura esistenti si sviluppa attraverso un'analisi cinematica lineare, verificando la struttura nei riguardi dei possibili meccanismi di collasso di "primo modo" (ribaltamento di pareti o porzioni di esse per effetto di azioni sismiche ortogonali ad esse) o di "secondo modo" (ribaltamento di pareti con porzioni di paramenti murari trasversali per effetto di azioni sismiche ortogonali ad esse).

Nell'analisi del meccanismo "di primo modo" viene presa in esame una striscia di parete della larghezza di un metro trascurando la partecipazione trasversale, mentre nel caso del meccanismo "di secondo modo" si può considerare la parete per la sua intera estensione. Ad entrambi gli schemi si applicano i carichi verticali (solai, copertura, pesi propri) combinati opportunamente; a ciascuna massa sismica corrisponde un carico orizzontale (azione sismica) pari ad essa moltiplicata per il coefficiente amplificativo λ e applicato nel baricentro della massa.

Per l'applicazione del metodo di analisi si ipotizza, in genere, per la muratura una resistenza a compressione infinita, una resistenza nulla a trazione e l'assenza di scorrimento tra i blocchi.⁵ Per un'analisi più rigorosa si possono prendere in considerazione come valori di calcolo di resistenza della muratura i valori riportati nella tabella 11.D.1 dell'Allegato 11.D, divisi per il Fattore di Confidenza (FC) relativo a uno dei tre Livelli di Conoscenza (LC) acquisito in base alle indagini e verifiche effettuate in-situ e in laboratorio sui dettagli costruttivi e sulle proprietà dei materiali del manufatto edilizio. Nel caso in cui si consideri una resistenza a compressione infinita della muratura, le cerniere attorno alle quali avviene il ribaltamento della parete si disporranno sul lembo esterno della stessa, mentre nell'eventualità che si consideri una resistenza limitata la posizione della cerniera sarà arretrata.

La valutazione della sicurezza viene eseguita nei confronti dello stato limite ultimo (SLU) per la combinazione dell'effetto dell'azione sismica con le altre azioni (carichi permanenti, azioni variabili) applicando gli opportuni coefficienti di combinazione. Sviluppata l'analisi dei carichi e applicate le forze allo schema strutturale di calcolo, si procede imponendo l'equilibrio alla rotazione attorno alla cerniera tra il momento stabilizzante (dato dai cari-

chi statici verticali) e il momento ribaltante (dovuto alle azioni orizzontali), per il quale $M_s = \lambda x M_R$, da cui si ricava il valore di λ .

Secondo la normativa l'elemento strutturale si trova in condizioni di sicurezza se è soddisfatta la seguente disequazione:

$$\lambda \geq \frac{a_g \cdot S}{q} \cdot \left(1 + 1.5 \cdot \frac{Z}{H} \right)$$

dove:

a_g : accelerazione orizzontale massima al suolo e dipende dalla zona sismica;

s : parametro che dipende dalla categoria di suolo di fondazione adottata;

q : fattore di struttura (imposto dalla normativa pari a 2.0 allo SLU);

Z : altezza rispetto alla fondazione dell'edificio della risultante delle azioni sismiche agente sulla catena cinematica esaminata;

H : altezza edificio dallo spicco della fondazione.

In base al confronto tra il valore del moltiplicatore dei carichi orizzontali derivante dall'analisi e quello dettato dalla normativa è possibile affermare se il meccanismo di collasso analizzato potrà innescarsi o meno.

Nel caso in cui, come sovente accade, la verifica al ribaltamento della parete muraria di facciata dia esito negativo, bisogna definire dei provvedimenti tecnici che evitino l'instaurarsi dei meccanismi di collasso. Questi rientrano nella categoria degli interventi di "miglioramento" antisismico, definiti dal D.M. 14/01/2008, come **tutti gli interventi che siano comunque finalizzati ad accrescere la capacità di resistenza delle strutture esistenti alle azioni considerate, pur senza necessariamente raggiungere i livelli di sicurezza richiesti dalle norme**. Tra questi, quelli più idonei a ridurre gli effetti sismici, sono le tirantature orizzontali che evitano il ribaltamento e le cordolature di piano e di coronamento che garantiscono un comportamento scatolare dell'edificio.

L'esperienza del recente terremoto de L'Aquila ha dimostrato ancora una volta che gli edifici storici in muratura che superano indenni il sisma o che subiscono lievi danni sono proprio quelli che presentano una buona tecnica costruttiva del paramento murario, efficaci ammorsamenti tra le pareti e incatenamenti metallici o cordolature a livello dei piani e della copertura.

NOTE

1. D. D'Ayala e E. Speranza, 2002. An integrated procedure for the assessment of seismic vulnerability of historic buildings. In: 12th European Conference on Earthquake Engineering. Paper Reference 561
2. A.Giuffrè, 1993. Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso Ortigia. p.181
3. A.Giuffrè, 1993. Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso Ortigia. p.135
4. Regione Toscana – Dipartimento Politiche Territoriali e Ambientali, 2002. Linee guida per le verifiche sismiche.
5. O.P.C.M. 3274/2003 e ss.mm. e ii. Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per costruzioni in zona sismica. Allegato 11.C