

FATTORE DI CONFIDENZA SUL MODELLO A TELAIO EQUIVALENTE IN PRESENZA DI IRREGOLARITÀ GEOMETRICHE NELLE PARETI MURARIE

Claudio PAGANI, Luca SALVATORI, Maurizio ORLANDO, Paolo SPINELLI

SOMMARIO

Il modello a telaio equivalente, rispetto ad altre tecniche di modellazione, ha vantaggi in termini di leggibilità dei risultati ed efficienza computazionale. Dal momento che è esplicitamente approvato dalle normative tecniche, è ampiamente utilizzato nella pratica professionale. Tuttavia, in presenza di irregolarità nella disposizione delle aperture, una circostanza comune nelle strutture esistenti, è difficile identificare in modo univoco la geometria del telaio equivalente e l'attendibilità dei risultati ottenuti nei casi più irregolari è dubbia. Nel presente articolo, il problema dell'irregolarità è trattato confrontando i risultati ottenuti con il modello a telaio equivalente con quelli ottenuti tramite modellazione ad elementi finiti in campo nonlineare, ipotizzando che quest'ultima meglio rappresenti il comportamento reale delle pareti irregolari. È stato sviluppato un solutore per modelli a telaio equivalente, utilizzando legami costitutivi più raffinati, rispetto a quelli di normativa, per la capacità di spostamento dei maschi murari e per il comportamento delle fasce di piano. Procedure automatizzate vengono utilizzate per eseguire un gran numero di analisi, in cui vengono confrontati i risultati dei due modelli in termini di vulnerabilità sismica predetta. Questa è poi messa in relazione con il grado di irregolarità delle pareti opportunamente misurato. Infine viene proposto un fattore di confidenza sull'affidabilità del modello a telaio equivalente che aumenta con il grado di irregolarità.

ABSTRACT

The equivalent-frame method, compared to other modeling techniques, has advantages in terms of readability of results and computational efficiency. Since it is explicitly endorsed by building codes, it is widely used in the professional practice. However, in presence of irregularities in the layout of openings, a common circumstance in existing structures, it is difficult to univocally identify the equivalent frame and the reliability of the results obtained for the most irregular cases is doubtful. Here, the issue of irregularity is treated by comparing equivalent-frame results with finite-element ones, which are assumed to better represent the actual behavior of irregular walls. An equivalent-frame solver is developed, by using more refined failure criteria for the masonry piers and strength criterion for the spandrels than the oversimplified ones suggested by building codes. Automated procedures are used to perform a large number of analyses, in which equivalent-frame results and finite-element ones are compared. The difference in terms of seismic vulnerability between the two models is correlated with a measure of the degree of irregularity of the walls. A geometric confidence factor, increasing with the degree of irregularity, is proposed to account for the epistemic uncertainties in the equivalent-frame modelling.

1. INTRODUZIONE

L'analisi sismica di edifici in muratura viene spesso affrontata tramite il *metodo del telaio equivalente* [1][2][3], un modello in cui maschi e fasce vengono modellati come elementi monodimensionali e rappresentano rispettivamente i pilastri e le travi del telaio "equivalente" alla struttura muraria.

L'attuale normativa nazionale [4] suggerisce l'adozione di tale modello per il calcolo di strutture in muratura, stabilendo che "in presenza di elementi di accoppiamento, l'analisi può essere effettuata utilizzando modelli a telaio, in cui le parti di intersezione tra elementi verticali e orizzontali possono essere considerate infinitamente rigide". Se confrontato con le altre tecniche di modellazione, il metodo a telaio equivalente

presenta molti vantaggi, sia in termini di facilità di lettura dei risultati (per la familiarità che i progettisti hanno con le strutture intelaiate), sia in termini computazionali (per il ridotto numero di gradi di libertà del modello). Per questi motivi, il modello del telaio equivalente risulta la tecnica di modellazione più utilizzata nella pratica professionale per l'analisi di strutture in muratura.

Tuttavia, il metodo evidenzia alcune problematiche nei confronti di strutture che presentano configurazioni geometriche irregolari, aventi disallineamenti delle aperture o irregolarità delle loro dimensioni: tali circostanze, infatti, rendono difficoltosa o non univoca l'identificazione di un telaio.

La stessa Normativa Tecnica vigente evidenzia il problema relativo a tale tematica, stabilendo che "le costruzioni in muratura ordinaria debbono avere le aperture praticate nei muri verticalmente allineate" e che "in assenza di valutazioni più accurate, si prendono in considerazione nel modello strutturale e nelle verifiche esclusivamente le porzioni di muro che presentino continuità verticale del piano oggetto di verifica fino alle fondazioni". La normativa dunque stabilisce limitazioni solamente per un tipo di irregolarità geometrica, ovvero il disallineamento orizzontale, e dà indicazioni molto restrittive (imponendo di considerare solamente le porzioni di muro continue dalla fondazione al piano studiato) per il calcolo di strutture in muratura con irregolarità.

Nel patrimonio edilizio italiano la presenza di irregolarità nella disposizione e nelle dimensioni delle aperture è molto comune, sia nell'edilizia monumentale, che in quella di minor pregio (Figura 1). In presenza di tali irregolarità l'individuazione di un telaio equivalente è difficoltosa o effettuabile in maniera arbitraria. I programmi di calcolo commerciali basati sulla modellazione a telaio equivalente sono spesso in grado di generare in modo algoritmico un telaio partendo da qualsiasi parete forata, tuttavia l'attendibilità dei modelli ottenuti nei casi più irregolari è quantomeno dubbia. Altre considerazioni su aperture nei pannelli di tamponatura sono discusse in Margiacchi *et al.* [5].

Oltre al problema geometrico intrinseco nella trattazione a telaio di pareti irregolari [6], una ulteriore sorgente di problemi per i modelli a telaio equivalente sono i criteri di resistenza e rottura per i maschi e le fasce, previsti dalla normativa tecnica nazionale ed implementati nei software commerciali. Infatti, il criterio di rottura dei maschi murari è funzione dell'altezza del pannello e del modo di rottura, e non tiene conto di altri



Figura 1: Esempi di irregolarità delle aperture in edifici esistenti in muratura.

aspetti, quali la snellezza, lo schema statico o l'impegno a compressione; inoltre il criterio presenta una discontinuità in corrispondenza della transizione tra i modi di rottura: infatti, indicando con h l'altezza del pannello, si passa da un valore dello spostamento ultimo pari a $8‰ h$ in caso di rottura per pressoflessione ($6‰ h$ per gli edifici esistenti), ad un valore in caso di rottura per taglio pari a $4‰ h$.

Per quanto riguarda le fasce di piano, nelle NTC non viene fornita alcuna indicazione sul comportamento post-picco; inoltre la resistenza è valutata in maniera molto approssimata, assumendo la fascia come un maschio ruotato di 90° , non tenendo conto dell'ortotropia della muratura. Inoltre, la resistenza è considerata nulla in assenza di elementi tensoresistenti.

Circa la trattazione delle irregolarità geometriche, sorgono le seguenti domande:

- Qual è il limite di irregolarità geometrica delle aperture oltre il quale non è più possibile utilizzare il modello a telaio equivalente?
- Altrimenti, è possibile definire un fattore di sicurezza "geometrico", funzione di un opportuno indice di irregolarità, che permette al professionista di continuare a studiare la parete irregolare con questo modello?

Per poter rispondere a questi interrogativi, si è proceduto con il seguente schema.

- 1) È stata proposta una misura puramente geometrica del livello di irregolarità di una parete.
- 2) Si è modellato la parete con un approccio al continuo non lineare e con quello a telaio equivalente.
- 3) Si è ipotizzato che entrambi i modelli siano validi in caso di pareti regolari (ipotesi realizzata tramite calibrazione degli stessi su un caso sperimentale).
- 4) Si è ipotizzato che l'approccio al continuo sia valido anche in presenza di irregolarità arbitrarie.

- 5) Si è stimato l'errore (in termini di capacità sismica stimata tramite analisi statica non lineare) del modello a telaio equivalente rispetto al continuo.
- 6) Si è proceduto ad analisi automatiche in modo da ottenere un numero statisticamente significativo di analisi.

Il lavoro risolve alcuni problemi riscontrati in precedenti lavori di alcuni degli autori [7], tramite l'utilizzo di un software sviluppato ad-hoc per le analisi con il modello a telaio equivalente, che ha permesso di superare i limiti di normativa e dei software commerciali, e di automatizzare completamente la procedura, permettendo di ottenere un numero statisticamente significativo di analisi.

Il lavoro è organizzato così come descritto nel seguito. Nel paragrafo 2, si richiama la definizione proposta di misura di irregolarità. Nel paragrafo 3, viene descritto l'algoritmo della procedura automatizzata. Nel paragrafo 4, sono descritti i dettagli delle due tecniche di modellazione numerica utilizzate e sono forniti i parametri di calibrazione. Nel paragrafo 5, viene quantificata la correlazione tra la misura di irregolarità e l'errore commesso dal telaio equivalente; viene inoltre eseguita un'analisi statistica su un grande numero di pareti generate casualmente e viene definito un fattore di confidenza geometrico, funzione della misura di irregolarità. Nel paragrafo 6 vengono infine riportate le considerazioni conclusive.

2. MISURA DELLE IRREGOLARITÀ

In un precedente lavoro di Berti M. *et al.* (2017) [7] sono state identificate le più ricorrenti tipologie di irregolarità ed è stato stabilito un criterio di classificazione.

Si considera una parete con N piani e M aperture rettangolari per ogni piano. I piani sono numerati dal terreno ($j = 1$) fino in sommità ($j = N$), mentre gli allineamenti verticali delle aperture da sinistra ($i = 1$) verso destra ($i = M$).

Considerando un sistema di riferimento cartesiano, con l'origine nell'angolo in basso a sinistra della parete, assumendo assi X e Y rispettivamente orizzontale e verticale, si definisce $(X_{G,ij}; Y_{G,ij})$ come la posizione del baricentro della i -esima apertura del j -esimo livello, b_{ij} la sua larghezza e h_{ij} la sua altezza.

Per definire le irregolarità e i relativi indici occorre riferirsi ad una ideale parete con configurazione regolare delle aperture aventi allineamenti e dimensioni ottenuti con le medie aritmetiche delle relative proprietà geometriche.

Gli allineamenti orizzontali e verticali sono dati da:

$$\bar{Y}_{G,j} = \frac{\sum_{i=1}^M Y_{G,ij}}{M} \quad \bar{X}_{G,i} = \frac{\sum_{j=1}^N X_{G,ij}}{N}$$

mentre le larghezze e le altezze delle finestre regolarizzate sono:

$$\bar{h}_j = \frac{\sum_{i=1}^M h_{ij}}{M} \quad \bar{b}_i = \frac{\sum_{j=1}^N b_{ij}}{N}$$

Per illustrare il procedimento di regolarizzazione si riporta un esempio su un edificio di 3 piani con una disposizione irregolare di aperture e la relativa parete regolarizzata (Figura 2).

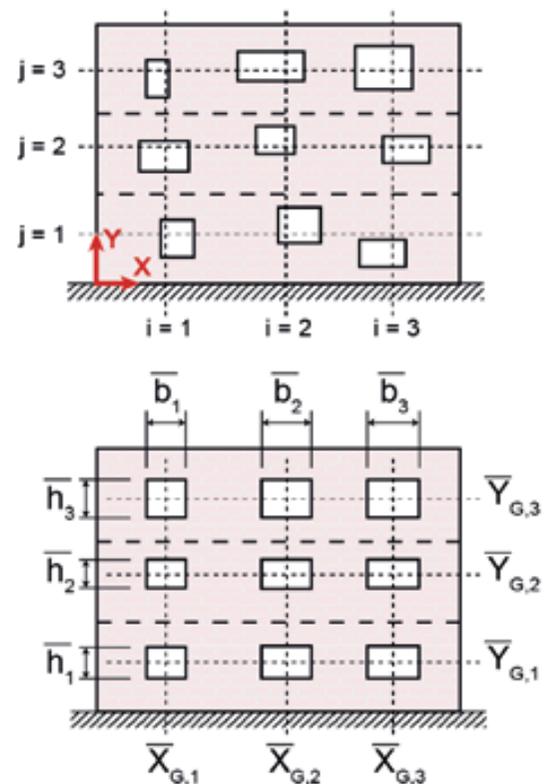


Figura 2: Parete con disposizione irregolare di aperture (sopra) e relativa parete regolare ideale (sotto), da cui le irregolarità sono misurate.

A questo punto ci sono gli strumenti per definire i 4 indici di irregolarità (disallineamento orizzontale e verticale, in larghezza e in altezza) per ciascuna apertura, che misurano quanto essa si discosta dalla sua configurazione nella parete regolare ideale. L'irregolarità da disallineamento orizzontale si riscontra quando la singola apertura presenta baricentro geometrico disallineato in direzione orizzontale rispetto alla linea centrale della fila di riferimento (Figura 3). L'indice I_h che misura l'entità di tale disallineamento può essere definito come il valore del disallineamento normalizzato rispetto alla distanza tra gli allineamenti verticali della matrice delle aperture.

$$I_X = \frac{2(X_{G,ij} - \bar{X}_{G,i})}{\bar{X}_{G,i+1} - \bar{X}_{G,i-1}}$$

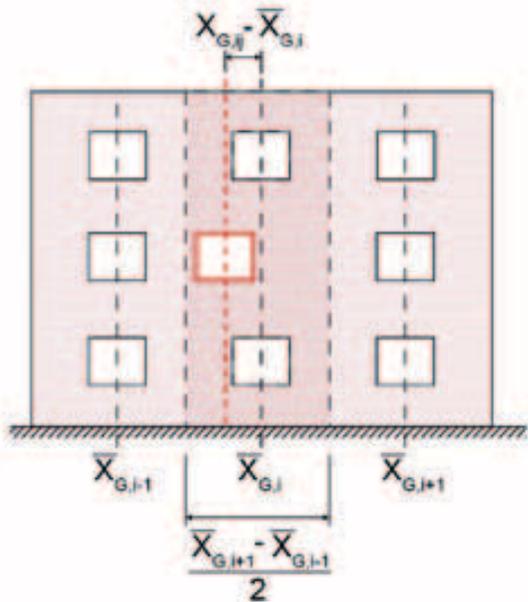


Figura 3: Irregolarità da disallineamento orizzontale.

L'irregolarità da disallineamento verticale si riscontra quando la singola apertura presenta baricentro geometrico disallineato in direzione verticale, rispetto alla linea centrale del piano di riferimento (Figura 4). L'indice di irregolarità I_Y che misura l'entità di tale disallineamento può essere definito come il valore del disallineamento normalizzato rispetto all'altezza di piano ΔH_j .

$$I_Y = \frac{Y_{G,ij} - \bar{Y}_{G,j}}{\Delta H_j}$$

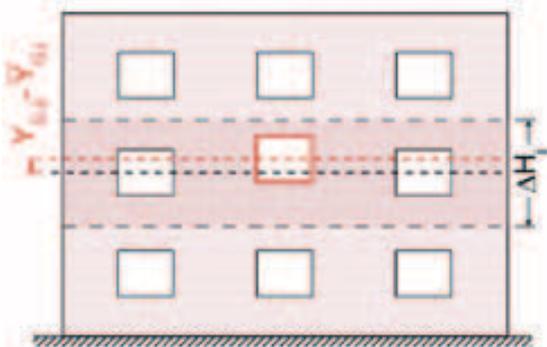


Figura 4: Irregolarità da disallineamento verticale.

L'irregolarità in larghezza si riscontra quando la larghezza b_{ij} della singola apertura differisce dalla larghezza media \bar{b}_i delle aperture del relativo allineamento verticale (Figura 5). L'indice di irregolarità I_W che misura l'entità di tale disallineamento può essere definito normalizzando la differenza

tra le citate larghezze rispetto alla distanza tra gli adiacenti allineamenti verticali.

$$I_W = \frac{b_{ij} - \bar{b}_i}{\bar{X}_{G,i+1} - \bar{X}_{G,i-1}}$$

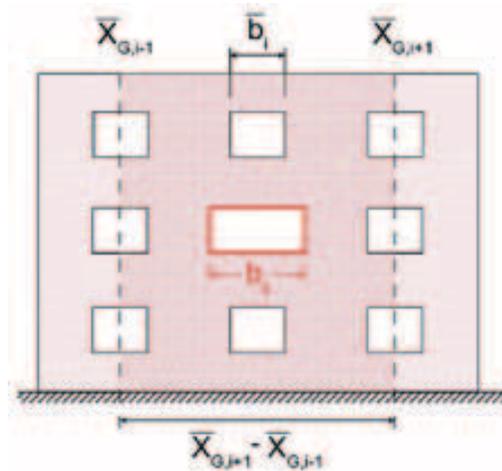


Figura 5: Irregolarità in larghezza.

L'irregolarità in altezza si riscontra quando l'altezza h_{ij} della singola apertura differisce dall'altezza media \bar{h}_j delle aperture del relativo allineamento orizzontale (Figura 6). L'indice di irregolarità I_H che misura l'entità di tale disallineamento può essere definito normalizzando la differenza tra le citate altezze rispetto all'altezza di piano ΔH_j .

$$I_H = \frac{h_{ij} - \bar{h}_j}{\Delta H_j}$$

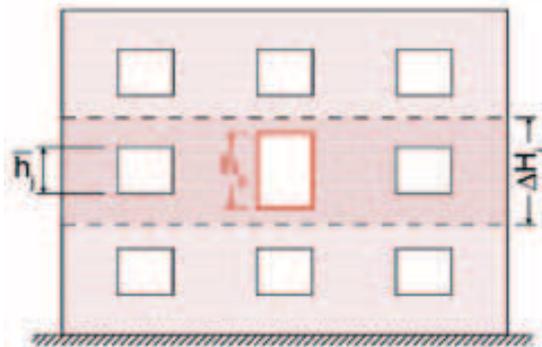


Figura 6: Irregolarità in altezza.

Infine, è possibile definire un *indice di irregolarità globale* della parete, definito come la media sulle aperture della somma dei quattro indici di irregolarità, opportunamente pesati, relativi a ciascuna apertura:

$$I = \frac{1}{M} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{h \in \{X,Y,W,H\}} a_{ijh} I_{h,ij}$$

I pesi μ_{hh} , che verranno definiti oltre, tengono conto dell'influenza di ciascun indice di irregolarità, relativo ad una data apertura, sull'errore commesso a livello globale.

3. PROCEDURA DI ANALISI

Il modello a telaio equivalente è affetto da incertezze quando vengono analizzate pareti con disposizione irregolare di aperture. Nel presente lavoro ci si è occupati di determinare, se esiste, il legame tra l'indice di irregolarità globale, funzione della geometria della parete, e l'errore commesso da tale modello. A tal fine è stata ideata la procedura descritta qui di seguito e sintetizzata nello schema di Figura 7.

A partire da una data parete, vengono calcolati gli indici di irregolarità; successivamente viene determinata la vulnerabilità della struttura, valutata secondo due tipi di modellazione: un modello a telaio equivalente, tramite un nuovo solutore realizzato in ambiente MATLAB, e un modello ad elementi finiti, con l'ausilio del software TNO DIANA. Entrambi i modelli, come si vedrà più avanti, sono stati calibrati sui dati della prova sperimentale realizzata su un edificio in muratura dall'Università di Pavia.

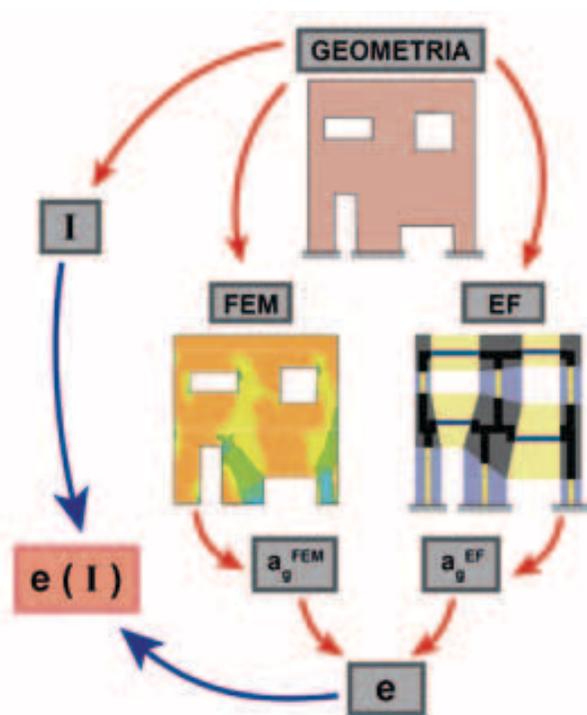


Figura 7: Schema della procedura di analisi.

L'errore tra i due modelli è stato valutato sotto l'ipotesi che il modello FEM sia un'estensione dei risultati sperimentali e imputando l'errore solo al modello a telaio equivalente.

Al fine di ottenere un numero statisticamente significativo di analisi, è stata messa a punto una procedura automatizzata che contiene:

1. un *pre-processor*, capace di calcolare gli indici di irregolarità della parete e preparare i dati di input per i due software di calcolo;
2. un *solutore a telaio equivalente* sviluppato ad hoc che adotta opportuni criteri di resistenza e di rottura per i maschi e le fasce;
3. un' *interfaccia di input/output* per i risultati del modello FEM del software commerciale DIANA;
4. un *post-processor*, capace di ottenere dalle curve di capacità le corrispondenti vulnerabilità sismiche in termini di PGA e l'errore tra i due modelli.

4. MODELLAZIONE

I modelli di calcolo utilizzati sono stati validati sulla base dei risultati della prova realizzata dall'Università di Pavia [8] su un edificio in muratura ordinaria di due piani in scala 1:1 (Figura 8).

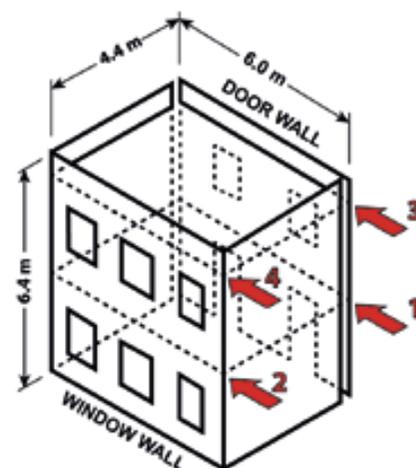


Figura 8: Geometria della prova sperimentale di Pavia

La costruzione è composta da quattro pareti in muratura a due teste, avente le dimensioni in pianta di 6 x 4,4 m ed un'altezza di 6,4 m. L'azione sismica è stata simulata tramite l'applicazione di 4 martinetti a spostamento controllato posti a livello degli impalcati. La struttura è stata sottoposta a spostamenti ciclici di ampiezza crescente ed è stato registrato il grafico "taglio alla base

– spostamento in sommità” (Figura 9), dal cui inviluppo è stata ottenuta la curva di capacità, con la quale sono stati calibrati i modelli di calcolo. La parete presa come riferimento è la parete D, chiamata anche “Pavia Door Wall”.

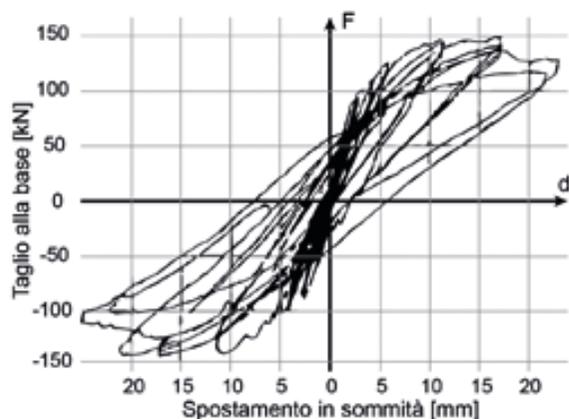


Figura 9: Risposta ciclica sperimentale della Pavia Door Wall.

Come è stato già detto nell'introduzione, i modelli a telaio equivalente, che implementano i criteri di normativa per la rottura dei maschi e per la resistenza delle fasce di piano, presentano una dubbia attendibilità nel caso di pareti con disposizione irregolare di aperture. Perciò, è stato sviluppato un nuovo solutore in ambiente MATLAB, in cui sono stati introdotti dei criteri diversi da quelli di normativa, scelti opportunamente nella letteratura (Figura 10).

Il criterio di rottura dei maschi murari adottato è basato sul drift [9], ed il drift ultimo è funzione della snellezza λ e dell'impegno a compressione del pannello:

$$\theta_u = \frac{a_1 + \lambda a_2}{1000 p^{a_3}}$$

I parametri a_1 , a_2 e a_3 sono stati calibrati su analisi numeriche agli elementi finiti su 9 diversi pannelli murari, con diversi valori dei parametri di snellezza e impegno a compressione. Il problema della capacità di spostamento è stato discusso in altri lavori di alcuni degli autori [10] [11] [12] [13].

Come criterio di resistenza delle fasce di piano è stato adottato il modello del “puntone ad arco” [14], secondo cui si viene ad instaurare una diffusione degli sforzi schematizzabile con un sistema di due archi. La rottura avviene per schiacciamento delle estremità del puntone o per rottura a trazione nella zona centrale del pannello.

Per le analisi statiche non lineari sono state utilizzate procedure standard iterativo-incrementali in controllo indiretto di spostamento.

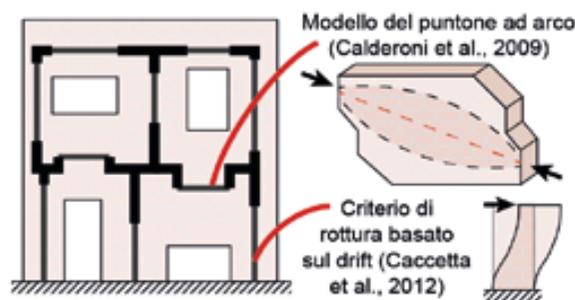


Figura 10: Modello a telaio equivalente.

Il modello agli elementi finiti è stato realizzato con l'ausilio del software TNO DIANA [15], un software che permette di trattare le non linearità riscontrabili nelle strutture in muratura. Le pareti analizzate sono state discretizzate tramite elementi CQ16M, quadrilateri isoparametrici a 8 nodi. Come legame costitutivo è stato scelto un modello a fessure rotanti, con leggi di softening parabolica a compressione e lineare a trazione, basate sull'energia di frattura. Sono state realizzate analisi statiche non lineari, utilizzando una procedura incrementale a lunghezza d'arco, il metodo iterativo di Newton-Raphson modificato ed il criterio di convergenza basato sull'energia di deformazione (Figura 11).

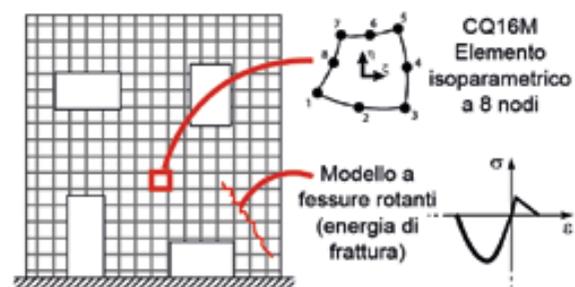


Figura 11: Modello ad elementi finiti.

		EF	FEM
E	[MPa]	787	1029
f_c	[MPa]	1.16	1.18
f_t	[MPa]	0.08	0.07
G_c/h	[kJ/m ³]	-	40
G_f^I	[J/m ²]	-	70
a_1	[-]	1.7	-
a_2	[-]	1.3	-
a_3	[-]	0.82	-

Tabella 1: Parametri meccanici dei modelli

I parametri meccanici di entrambi i modelli sono stati calibrati sulla curva di capacità sperimentale (Tabella 1), in modo tale da far coincidere le rispettive curve bilineari equivalenti (Figura 12). Sono

state inoltre condotte le analisi di sensibilità, volte a verificare che una piccola variazione dei parametri meccanici non induca una grande variazione della risposta della struttura.

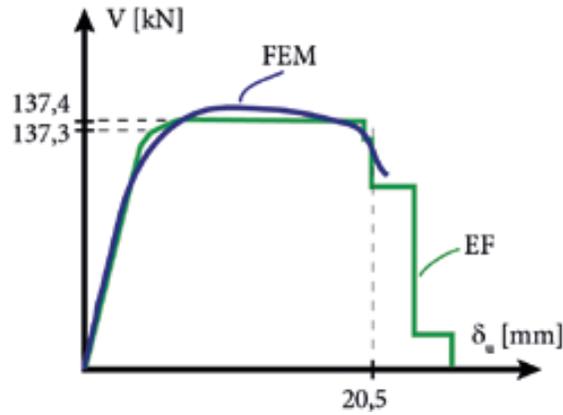


Figura 12: Curve di capacità dei modelli calibrati

5. ANALISI EFFETTUATE

Le analisi effettuate possono essere raccolte in due gruppi:

- nel Gruppo 1 si è indagato sugli errori introdotti dal singolo tipo di irregolarità di ciascuna apertura;
- nel Gruppo 2 è stato generato un gran numero di pareti con una distribuzione casuale di aperture ed è stata effettuata un'analisi statistica.

Nel Gruppo 1, a partire dalla configurazione regolare della parete della prova sperimentale di Pavia, è stata variata la geometria di partenza introducendo, per ciascuna finestra, ciascun tipo di irregolarità una per volta, e incrementando l'entità dell'anomalia ad ogni analisi. I risultati ottenuti possono essere riassunti in 16 grafici (4 tipi di irregolarità per ciascuna delle 4 aperture della parete) in cui si riporta l'andamento dell'errore in funzione dell'entità dell'irregolarità. L'errore è stato definito come:

$$e = \frac{|a_g^{EF} - a_g^{FEM}|}{a_g^{FEM}}$$

Dove a_g^{EF} e a_g^{FEM} sono le PGA di capacità stimate con il metodo N2 [16], utilizzando rispettivamente le curve di capacità del modello a telaio equivalente e ad elementi finiti.

I risultati mostrano che l'errore cresce all'aumentare dell'anomalia e che le linee di regressione hanno coefficienti angolari diversi fra loro, fatto che evidenzia che ciascun tipo di irregolarità incide sull'errore commesso con una diversa intensità.

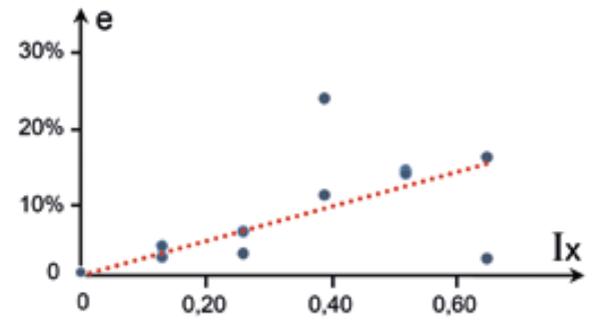


Figura 13: Regressione lineare dei dati relativi all'irregolarità da disallineamento orizzontale per l'apertura del piano terra di monte.

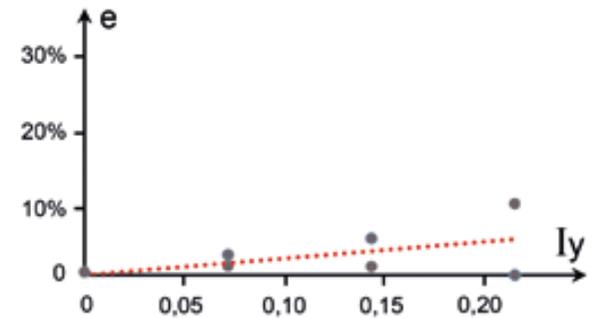


Figura 14: Regressione lineare dei dati relativi all'irregolarità da disallineamento verticale per l'apertura del piano terra di monte.

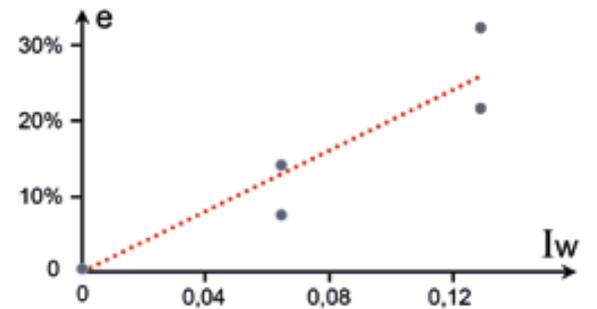


Figura 15: Regressione lineare dei dati relativi all'irregolarità in larghezza per l'apertura del piano terra di monte.

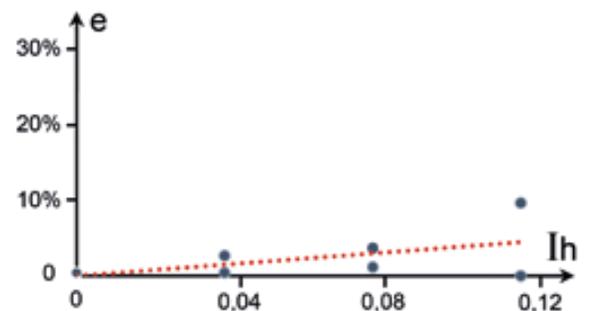


Figura 16: Regressione lineare dei dati relativi all'irregolarità in altezza per l'apertura del piano terra di monte.

Si riportano, a titolo di esempio, i risultati ottenuti per l'apertura del piano terra posizionata a monte rispetto all'azione sismica (Figura 13-16).

I coefficienti angolari delle linee di tendenza dei suddetti grafici rivestono una particolare importanza: essi rappresentano l'influenza sull'errore globale di ciascun tipo di irregolarità relativo ad una certa apertura. Essi dunque sono i pesi a_{hk} , già definiti nel Paragrafo 2, con cui determinare l'indice di irregolarità globale I . Inoltre, proprio per come sono stati definiti i pesi, si ha che:

$$e = \bar{e}(I) = I$$

In Figura 17 si riportano i valori dei coefficienti angolari dei 16 grafici ottenuti con le analisi del Gruppo 1, da cui si può dedurre che le irregolarità più influenti sono quelle in larghezza per le aperture al piano terra.



Figura 17: Coefficienti angolari delle linee di regressione dei dati relativi a ciascuna apertura e ciascun indice di irregolarità.

L'individuazione dei pesi a_{hk} e la determinazione del legame tra l'indice di irregolarità globale I e l'errore e , ha suggerito l'idea di introdurre un fattore di confidenza "geometrico", definito come:

$$FC_G = 1 + e(I) = 1 + I$$

Esso è stato concepito in analogia al fattore di confidenza sulla conoscenza degli edifici esistenti già presente in normativa e tiene in conto l'errore commesso dal metodo di analisi.

La vulnerabilità stimata dal modello a telaio equivalente, corretta con il fattore proposto, risulta:

$$a_{g,mod}^{EF} = \frac{a_g^{EF}}{FC_G}$$

Il Gruppo 2 di analisi è stato concepito per testare l'efficacia del fattore di confidenza FC_G . Sono state realizzate un totale di 600 coppie di analisi su altrettante geometrie di pareti generate in maniera casuale, dove si è mantenuto costante la larghezza,

l'altezza, il numero di piani e di aperture (gli stessi della "Pavia Door Wall"), e sono state variate le dimensioni e la posizione delle aperture (Figura 18).

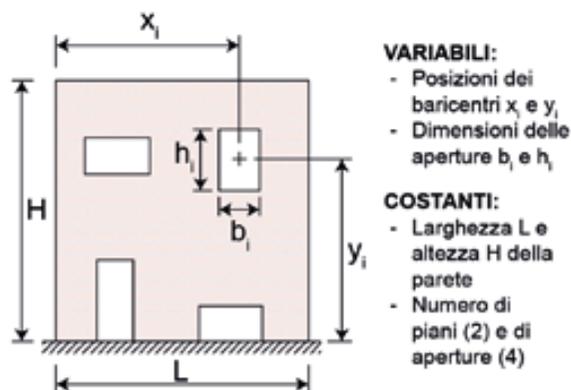


Figura 18: Pareti con distribuzione casuale di aperture.

In Figura 19 è stata riportata la nuvola di punti della serie delle analisi, dove ciascun punto ha come coordinate la coppia $(a_g^{EF}; a_g^{FEM})$, ovvero le PGA di capacità stimate rispettivamente con il modello a telaio equivalente a_g^{EF} e con il modello ad elementi finiti a_g^{FEM} .

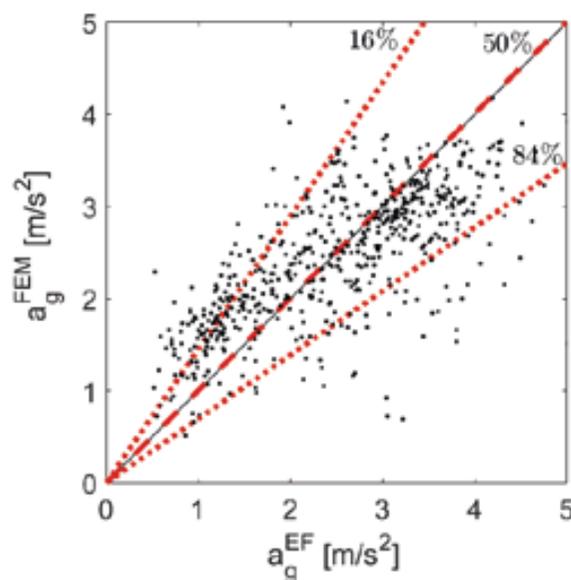


Figura 19: Stime di vulnerabilità del modello EF e del modello FEM.

La linea il cui coefficiente angolare rappresenta la mediana del rapporto a_g^{FEM}/a_g^{EF} (tratteggiata in rosso) è molto vicina alla bisettrice del quadrante: ciò significa che circa il 50% delle analisi sono a sfavore di sicurezza, ovvero la vulnerabilità calcolata con il modello a telaio equivalente risulta maggiore di quella ottenuta con il modello FEM.

Correggendo la stima sulla vulnerabilità del modello a telaio equivalente con il fattore di confidenza proposto, si ottengono i risultati mostrati in Figura 20.

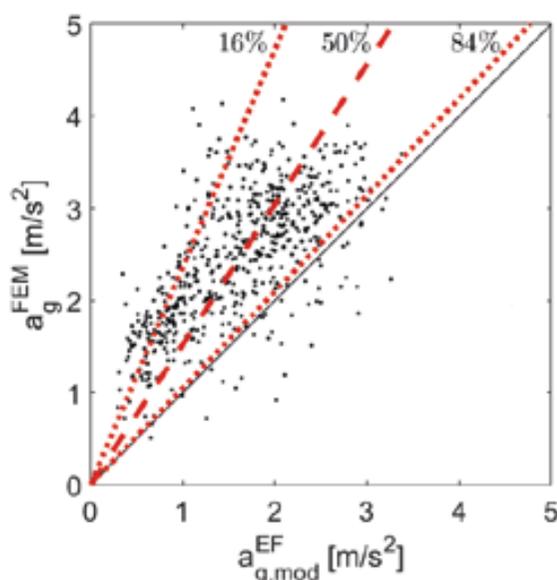


Figura 20: Stime di vulnerabilità del modello EF e del modello FEM dopo la correzione con il fattore di confidenza geometrico.

La nuvola si è spostata nella parte sopra la bisettrice del quadrante (zona in cui le analisi con il modello a telaio equivalente sono a favore di sicurezza). Dopo la correzione introdotta, il coefficiente di variazione è sceso dal 22,9% al 18,3% e la probabilità $\mathcal{P}[a_g^{EF} > a_g^{FEM}]$ di avere un'analisi a sfavore di sicurezza è scesa da 0,53 a 0,10. Entrambi i fatti sono ancora più evidenti nel grafico di Figura 21, dove è stata rappresentata la curva di densità di probabilità del rapporto a_g^{EF}/a_g^{FEM} .

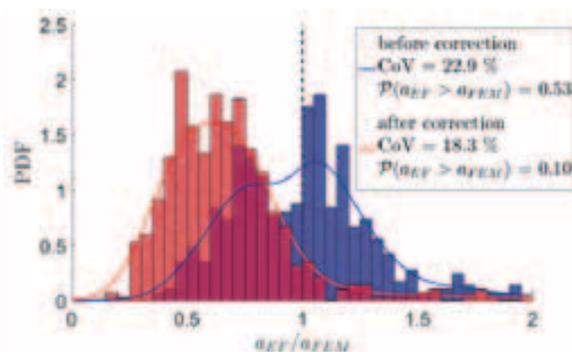


Figura 21: Funzione di densità di probabilità del rapporto tra le vulnerabilità prima (in blu) e dopo (in rosso) la correzione mediante il fattore di confidenza geometrico.

6. CONCLUSIONI

Il problema delle irregolarità è stato trattato confrontando i risultati ottenuti con il modello a telaio equivalente con quelli di un modello ad elementi finiti, supponendo che quest'ultimo rappresenti meglio il comportamento reale di pareti irregolari.

I criteri di resistenza e di rottura dei maschi murari e delle fasce di piano, forniti dalla normativa tecnica nazionale ed implementati nei software commerciali, sono stati considerati come uno dei problemi dei modelli a telaio equivalente, il quale è stato superato tramite lo sviluppo di un solutore a telaio equivalente in cui sono stati introdotti criteri per la rottura dei maschi murari e la resistenza delle fasce di piano più raffinati rispetto a quelli previsti dalla normativa.

Per una configurazione regolare, i parametri dei due modelli sono stati calibrati in modo che il loro comportamento non lineare in termini di rigidità, resistenza e capacità di spostamento fosse equivalente a quello di un test sperimentale di riferimento.

Sono state sviluppate delle procedure automatiche per eseguire un grande numero di analisi, che sono state divise in due gruppi.

Il primo gruppo di analisi era finalizzato a determinare l'influenza di ciascun indice di irregolarità relativo a ciascuna apertura sull'errore commesso in termini di accelerazione al suolo (PGA) di capacità. Ciò ha permesso di ottenere una stima dell'errore come funzione dell'indice di irregolarità.

Il secondo gruppo di analisi è stato pensato per testare l'efficacia del fattore di confidenza geometrico proposto.

È stato mostrato che correggendo le stime della PGA di capacità del modello a telaio equivalente con il fattore di confidenza proposto, non solo i risultati vengono spostati a favore di sicurezza (il che è una cosa ovvia per il fatto che è un fattore maggiore di 1), ma sono anche meno dispersi. Ciò significa che la correzione agisce selettivamente, andando a penalizzare maggiormente le strutture più irregolari.

I più importanti risultati di questo lavoro, rispetto alle precedenti pubblicazioni di alcuni degli autori sullo stesso tema, sono:

- Lo sviluppo di un solutore a telaio equivalente, che ha permesso di prescindere dai limiti di normativa e di introdurre appropriati criteri di resistenza e di rottura, oltre alla possibilità di automatizzare le analisi (i software com-

mercials non permettono di essere lanciati in modalità batch, ma solo tramite l'interfaccia grafica)

- L'automazione delle analisi con il modello al continuo eseguite con un software FEM commerciale i cui input e output sono stati generati e post-processati automaticamente tramite un algoritmo sviluppato ad-hoc per le analisi statistiche.

Alcuni aspetti necessitano ancora di essere esplorati in maniera più dettagliata. Per esempio la stima della vulnerabilità deve tenere in considerazione entrambi i versi dell'azione sismica nelle analisi statiche non lineari.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Magenes G., Calvi G. "Prospettive per la calibrazione di metodi semplificati per l'analisi sismica di pareti murarie." *Convegno Nazionale "La Meccanica delle murature tra teoria e progetto"*, Messina, 1996.
- [2] Pugi, F. *Progettazione di Costruzioni in Muratura*. Firenze: Alinea, 2000.
- [3] Lagomarsino S., Penna A., Galasco A., Cattari S. "TREMURI program: an equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings." *Engineering Structures*, 2013: 56:1787-1799.
- [4] M.II.TT. "D.M. 14/01/2008 "Norme tecniche per le costruzioni"." *G.U. n.29 04/02/2008, 2008*.
- [5] Margiacchi F., Salvatori L., Orlando M., De Stefano M., Spinelli P. "Seismic response of masonry-infilled steel frames via multi-scale finite-element analyses." *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2016: 14(12):3529-3546.
- [6] Parisi F., Augenti N. "Seismic capacity of irregular unreinforced masonry walls with openings." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013: 42:101-121.
- [7] Berti M., Salvatori L., Spinelli P. "Unreinforced masonry walls with irregular opening layouts: reliability of equivalent-frame modelling for seismic vulnerability assessment." *Bulletin of Earthquake Engineering (Bulletin of Earthquake Engineering)*, 2017: 15:1213-1239.
- [8] Magenes G., Kingsley G.R., Calvi G.M. "Static testing of a full-scale, two story masonry building: test procedure and measured experimental response, in experimental and numerical investigation on a brick masonry building prototype." *Report 30 CNR-GN-DT:1.1-1.41 CNR-GNDT* (1995).
- [9] Orlando M., Salvatori L., Spinelli P., De Stefano M. "Displacement capacity of masonry piers: parametric numerical analyses versus international building codes." *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2016: 14:2259-2271.
- [10] Salvatori L., Marra A.M., Bartoli G., Spinelli P. "Probabilistic seismic performance of masonry towers: General procedure and a simplified implementation." *Engineering Structures*, 2015: 94:82-95.
- [11] Salvatori L., Marra A.M., Bartoli G., Spinelli P. "Role of correlation between mechanical parameters in the probabilistic seismic vulnerability of historical masonry towers." *International Journal of Masonry Research and Innovation*, 2017: 2(2-3):134-149.
- [12] Marra A.M., Salvatori L., Spinelli P., Bartoli G. "Incremental dynamic and nonlinear static analyses for seismic assessment of medieval masonry towers." *ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016: 31(4):1-10.
- [13] Bartoli G., Betti M., Biagini P., Borghini A., Ciavattone A., Girardi M., Lancioni G., Marra A.M., Ortolani B., Pintucchi B., Salvatori L. "Epistemic uncertainties in structural modeling: a blind benchmark for seismic assessment of slender masonry towers." *ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2017: 31(5):1-18.
- [14] Calderoni B., Cordasco E.A., Lenza P., Paccella G. "Un modello teorico semplificato per la valutazione del comportamento dei pannelli di fascia di piano." *In De Luca A., Spinelli P., WONDERmasonry 2011, Polistampa, Firenze.*, 2009: pp. 462-477.
- [15] TNO DIANA BV. *DIANA User's Manual, Release 9.4*. Delft, 2007.
- [16] Fajfar, P. "A nonlinear analysis method for performance-based seismic design." *Earthquake spectra*, 2000: 16(3): 573-592.

Claudio PAGANI, nato a Firenze nel 1990, laureato in Ingegneria Civile nel 2016, è studente del Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile e Ambientale presso l'Università degli Studi di Firenze. I suoi maggiori interessi riguardano il comportamento sismico di edifici in muratura ed i software di progettazione strutturale.

Luca SALVATORI, Ph.D., nato a Firenze nel 1976, laureato in Ingegneria Civile, è Ricercatore di

Tecnica delle Costruzioni presso l'Università di Firenze. Si occupa di modelli meccanici per le murature. Ha sviluppato schemi numerici per fessurazione nel calcestruzzo, aerodinamica di ponti, dinamica dei quasicristalli, transizioni liquido-solido, ottimizzazione di gusci, rischio sismico, profili formati a freddo. Si occupa di sviluppo di software per la meccanica delle strutture.

Maurizio ORLANDO, Ph.D., nato a Locri (RC) nel 1969, laureato in Ingegneria Civile nel 1993, è Professore Associato di Tecnica delle Costruzioni presso la Scuola di Ingegneria dell'Università di Firenze. I suoi principali argomenti di ricerca sono lo studio della risposta statica e sismica di strutture in c.a., di strutture esistenti in muratura

e di strutture leggere in acciaio formato a freddo, l'utilizzo del vetro come materiale strutturale.

Paolo SPINELLI, nato a Firenze nel 1950, è laureato in Ingegneria Civile presso l'Università di Firenze, dove attualmente è Professore Ordinario di Tecnica delle Costruzioni. È stato nell'università fiorentina Presidente del Corso di Laurea in Ingegneria Civile ed Edile. È stato anche Presidente dell'Ordine Ingegneri di Prato. Ha fatto parte del Consiglio della Scuola Superiore di Formazione Professionale del CNI. È Direttore del "bollettino ingegneri", si occupa di strutture in c.a., acciaio e legno e dello studio degli effetti del vento sulle costruzioni.

www.bollettinoingegneri.it

"Non solo per ingegneri"

visita il sito rinnovato e implementato

per informazioni, accessi e pubblicità

contattaci:

tel. 055 211345 - 055 282362

bollettinoingegneri@collegioingegneri.toscana.it