



*Gruppo Nazionale di
Geofisica della Terra Solida*

Convegno GNGTS

Bologna

19-21 novembre 2018

Il seguente lavoro ha vinto il Premio AGLC 2018

Citazione: Sancin et al., 2018. *Influenza della modellazione degli edifici sulla determinazione della loro vulnerabilità sismica*. Atti convegno GNGTS 2018, Bologna 19-21 novembre 2018.



INFLUENZA DELLA MODELLAZIONE DEGLI EDIFICI SULLA DETERMINAZIONE DELLA LORO VULNERABILITÀ SISMICA

L. Sancin¹, G. Dal Moro², C. Amadio¹, F. Romanelli³, F. Vaccari³

1 Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Trieste, Trieste, Italia

2 Institute of Rock Structure and Mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, Czech Republic

3 Dipartimento di Matematica e Geoscienze, Università degli Studi di Trieste, Trieste, Italia

Introduzione. La determinazione della vulnerabilità degli edifici passa attraverso il filtro della modellazione numerica. Il modello è, per definizione, una rappresentazione semplificata della realtà, che ci permette di descrivere in forma controllabile i fenomeni che caratterizzano un sistema complesso. L'onere computazionale è sempre da tenere in considerazione e spesso non è conveniente creare modelli eccessivamente dettagliati, che richiedono lunghi tempi di calcolo senza fornire elementi sostanzialmente diversi rispetto ai risultati di una modellazione più semplificata (Gerardi et al., 2017). Quali sono quindi i modelli che possiamo considerare abbastanza prossimi alla realtà? Ogni tipologia strutturale ha le sue particolarità. Questo lavoro si concentra sulle strutture esistenti a telaio in c.a., con tamponature in muratura, tipica tipologia costruttiva degli ultimi sessant'anni, per indagare l'effetto delle scelte di modellazione sul risultato delle analisi, senza considerare le problematiche sulle incertezze nella conoscenza delle caratteristiche delle strutture esistenti (Yalayer et al., 2007).

Le tamponature negli edifici a telaio in c.a., specialmente negli edifici più vecchi, dove all'epoca della progettazione non si dava peso al comportamento dinamico della struttura, venivano realizzate direttamente a contatto con la struttura portante. In questo modo essi, pur non essendo considerati strutturali, davano un contributo importante alla rigidezza e alla resistenza laterale dell'edificio. Per la valutazione della vulnerabilità sismica di un edificio esistente, si possono svolgere diversi tipi di analisi. Nelle analisi non lineari i tamponamenti forniscono un importante contributo nella prima parte della risposta sismica, in fase elastica, prima di rompersi in modo fragile, cosa che solitamente accade prima che gli elementi strutturali arrivino alla plasticizzazione. Per le analisi lineari, invece, l'incremento di rigidezza non solo porta ad un comportamento diverso in termini di modi di vibrare e regolarità della struttura, ma anche ad un incremento delle forze sismiche considerate per le valutazioni. Generalmente, infatti, una maggiore rigidezza (quindi un periodo proprio minore) porta a valori più alti di accelerazione sismica sullo spettro di risposta dato dalla Normativa vigente. Il risultato di un'analisi di vulnerabilità sismica dell'edificio, eseguita su un modello più o meno rigido, porta ad avere forze sismiche molto diverse e quindi risultati di vulnerabilità diversi. Limitandosi al comportamento elastico della struttura e quindi ad un'analisi dinamica lineare di tipo multimodale, si vuole valutare la variabilità dei risultati delle analisi in base al tipo di modellazione scelta dal progettista.

Caso studio. Viene modellato un edificio di 12 piani fuori terra e uno seminterrato, realizzato con travi e pilastri in c.a. e tamponamenti in muratura di 13 + 8 cm, ubicato a Gorizia. L'edificio presenta anche un vano scale, realizzato con setti in calcestruzzo poco armato, posto nel centro del lato lungo dell'edificio (Fig. 1). Questo fa sì che, considerando i soli elementi progettati come strutturali, il centro di rigidezza della struttura sia significativamente spostato verso il vano scale e notevolmente distante dal centro delle masse. La distanza tra i due centri dipende dalla distribuzione delle rigidezze in pianta per ogni piano ed è quindi influenzata dal tipo di modellazione scelta. Poiché si vuole indagare la fase elastica, si prende come riferimento lo spettro di progetto allo Stato Limite di Danno (SLD) calcolato per la città di Gorizia. Lo stesso edificio viene modellato tramite il programma di calcolo agli elementi finiti SAP2000 (CSI Inc.) secondo cinque diverse varianti e i risultati vengono confrontati con i risultati di misure vibrometriche.

Nel modello di riferimento (N1) sono presenti solamente gli elementi considerati strutturali: il telaio in c.a. e i setti del vano scale (i setti vengono modellati con elementi bidimensionali *shell*). Analogamente al primo, il secondo modello (N2) considera solamente gli elementi strutturali ma i setti vengono modellati come elementi *frame*. Questo modello potrebbe essere conveniente come scelta per un professionista, in quanto computazionalmente molto più leggero e facile da gestire rispetto al primo. Per la realizzazione del terzo modello (N3), viene ripreso il primo (si hanno quindi setti modellati con elementi *shell*) ma vengono aggiunte delle diagonali equivalenti alle tamponature, senza tener conto delle aperture. Il quarto modello (N4) è molto simile al terzo, ma le sezioni delle diagonali equivalenti alle tamponature vengono opportunamente ridotte al fine di tenere conto delle aperture (finestre e portefinestre). Infine, per realizzare il quinto modello (N5) viene ripreso il modello N2 e vengono aggiunti dei link rigidi che collegano tra loro gli elementi *frame* rappresentanti i setti al fine di conferire alla modellazione del vano scala un comportamento spaziale.

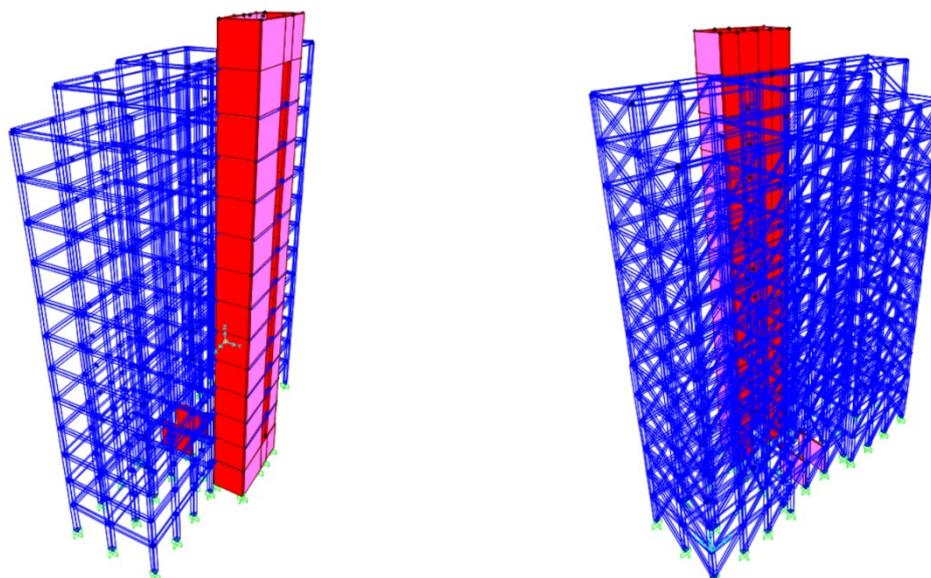


Figura 1: Modello numerico dell'edificio caso studio, realizzato in SAP2000 - senza tamponature (a) e con bielle compresse equivalenti alle tamponature (b)

Le diagonali equivalenti alle tamponature sono dimensionate secondo quanto prescritto nell'All. 2 della CM 10/04/1997 n.65. La tamponatura viene modellata come un puntone diagonale equivalente, incernierato alle estremità, di spessore t pari all'effettivo spessore della muratura e larghezza s pari al 10% della lunghezza della diagonale. Dal momento che si sono considerate analisi lineari, non vi è la possibilità di utilizzare elementi non lineari (funzionanti solo a compressione) e quindi viene modellata soltanto una diagonale, funzionante sia a compressione che a tensione per tener conto di entrambe le direzioni in cui può essere sollecitata la tamponatura. Il modulo elastico della muratura E_m viene preso pari a 17600 N/mm^2 . Per il calcolo delle sezioni delle diagonali equivalenti alle tamponature con aperture viene utilizzato il metodo proposto da Chen and Liu (2015), secondo cui il fattore riduttivo della rigidezza e resistenza è calcolato attraverso una funzione che dipende sia dalla dimensione che dall'eccentricità dell'apertura rispetto al centro del tamponamento e rispetto al verso di applicazione del carico. Avendo nel modello solo una diagonale per ogni tamponamento, il valore del coefficiente riduttivo viene calcolato come media dei due valori trovati per i due versi di carico. Nel modello N4 si è mantenuto per la muratura lo stesso modulo elastico utilizzato per il modello N3 in quanto la rigidezza viene ridotta direttamente tramite la riduzione della dimensione delle sezioni delle diagonali in base al tipo di foratura del tamponamento.

Poiché la Normativa vigente non fornisce specifiche indicazioni riguardo la modellazione dei tamponamenti, un progettista potrebbe scegliere uno qualsiasi di questi modelli (o altri più dettagliati) e/o scegliere moduli elastici diversi andando quindi ad ottenere risultati molto diversi rispetto la

vulnerabilità dell'edificio. Tra le normative vigenti in Italia infatti, la NTC 2018 accenna al problema degli effetti negativi degli elementi non strutturali solo rispetto alle nuove strutture (senza oltretutto dare un'indicazione precisa su come tenerne conto), mentre per le strutture esistenti non viene data alcuna indicazione. L'Eurocodice 8 prescrive invece l'utilizzo di un coefficiente atto ad amplificare le forze sismiche per considerare le irregolarità in altezza che i tamponamenti possono provocare.

Il confronto tra i risultati dei cinque modelli viene eseguito considerando i periodi propri della struttura, la forma dei modi di vibrare (tramite le masse partecipanti) e i tagli alla base ottenuti con analisi dinamica lineare nelle due direzioni, X e Y, secondo le combinazioni date dalla Norma. In Tabella 1 sono riassunti i risultati ottenuti dai cinque modelli descritti. La

Modo	N1			N2			N3			N4			N5		
	T [s]	UX [-]	UY [-]	T [s]	UX [-]	UY [-]	T [s]	UX [-]	UY [-]	T [s]	UX [-]	UY [-]	T [s]	UX [-]	UY [-]
1	1.96	0.20	0.12	3.18	0.00	0.63	1.01	0.00	0.65	1.10	0.00	0.65	1.93	0.45	0.00
2	1.75	0.06	0.50	2.60	0.07	0.00	0.64	0.59	0.00	0.76	0.55	0.00	1.74	0.00	0.62
3	1.02	0.42	0.00	1.72	0.61	0.00	0.52	0.12	0.00	0.59	0.15	0.00	0.76	0.31	0.00
T _b (X) [kN]	1840.69			1444.54			3068.20			2568.56			1404.16		
T _b (Y) [kN]	2024.21			1039.19			2542.95			2371.42			1934.49		

Tabella 2 pone in evidenza come i periodi della struttura cambino anche del 67% da un modello all'altro, mentre i tagli alla base, che derivano da una combinazione dei vari modi, cambino del 67% per il modello N3 rispetto al modello N1. Si può notare anche che il modello N5 è il più prossimo al modello N1.

I risultati delle modellazioni sono stati poi confrontati anche con i dati ottenuti da misure vibrazionali grazie alle quali sono identificati i diversi modi e le rispettive frequenze. Le misure sono state eseguite ponendo due velocimetri ai due angoli opposti della copertura dell'edificio (punti P1 e P2) e i dati sono stati elaborati secondo il metodo GHM (Gaussian-filtered Horizontal Motion - Dal Moro et al., 2018). I risultati mostrano chiaramente sei modi vibrazionali (Fig. 2, segnali da M1 a M6). Il segnale S (ancora Fig. 2) si riferisce ad un segnale spurio transitorio che, come tale, non si riferisce ad un modo vibrazionale della struttura.

Tabella 1: Risultati ottenuti dai 5 modelli, in termini dei primi 3 modi di vibrare, espressi in periodo proprio (T) e massa partecipante (UX e UY) e in termini di taglio alla base (T_b) allo SLD.

Modo	N1			N2			N3			N4			N5		
	T [s]	UX [-]	UY [-]	T [s]	UX [-]	UY [-]	T [s]	UX [-]	UY [-]	T [s]	UX [-]	UY [-]	T [s]	UX [-]	UY [-]
1	1.96	0.20	0.12	3.18	0.00	0.63	1.01	0.00	0.65	1.10	0.00	0.65	1.93	0.45	0.00
2	1.75	0.06	0.50	2.60	0.07	0.00	0.64	0.59	0.00	0.76	0.55	0.00	1.74	0.00	0.62
3	1.02	0.42	0.00	1.72	0.61	0.00	0.52	0.12	0.00	0.59	0.15	0.00	0.76	0.31	0.00
T _b (X) [kN]	1840.69			1444.54			3068.20			2568.56			1404.16		
T _b (Y) [kN]	2024.21			1039.19			2542.95			2371.42			1934.49		

Tabella 2: Confronto dei periodi propri e dei tagli alla base T_b , rispetto al modello N1.

N2			N3			N4			N5		
ΔT	ΔT_b (X)	ΔT_b (Y)	ΔT	ΔT_b (X)	ΔT_b (Y)	ΔT	ΔT_b (X)	ΔT_b (Y)	ΔT	ΔT_b (X)	ΔT_b (Y)
62%			-49%			-44%			-2%		
48%	-22%	-49%	-64%	67%	26%	-57%	40%	17%	0%	-24%	-4%
67%			-49%			-42%			-26%		

In Fig. 3 vengono riportati i grafici GHM riferiti ai primi tre modi vibrazionali (si tratta sostanzialmente di graficare i movimenti registrati presso i due punti di misura ad una specifica frequenza – in questo caso 1.6, 2.16 e 2.63 Hz). Il modo M1 è prettamente traslazionale in direzione NS (corrispondente al lato corto dell'edificio), il modo M2 è pressoché puramente rotazionale, mentre il modo M3 appare essere un modo roto-traslatorio. I successivi tre modi (M4, M5 e M6) sostanzialmente ripetono a frequenze più alte l'andamento dei primi tre ma con un'ampiezza di circa un ordine di grandezza inferiore.

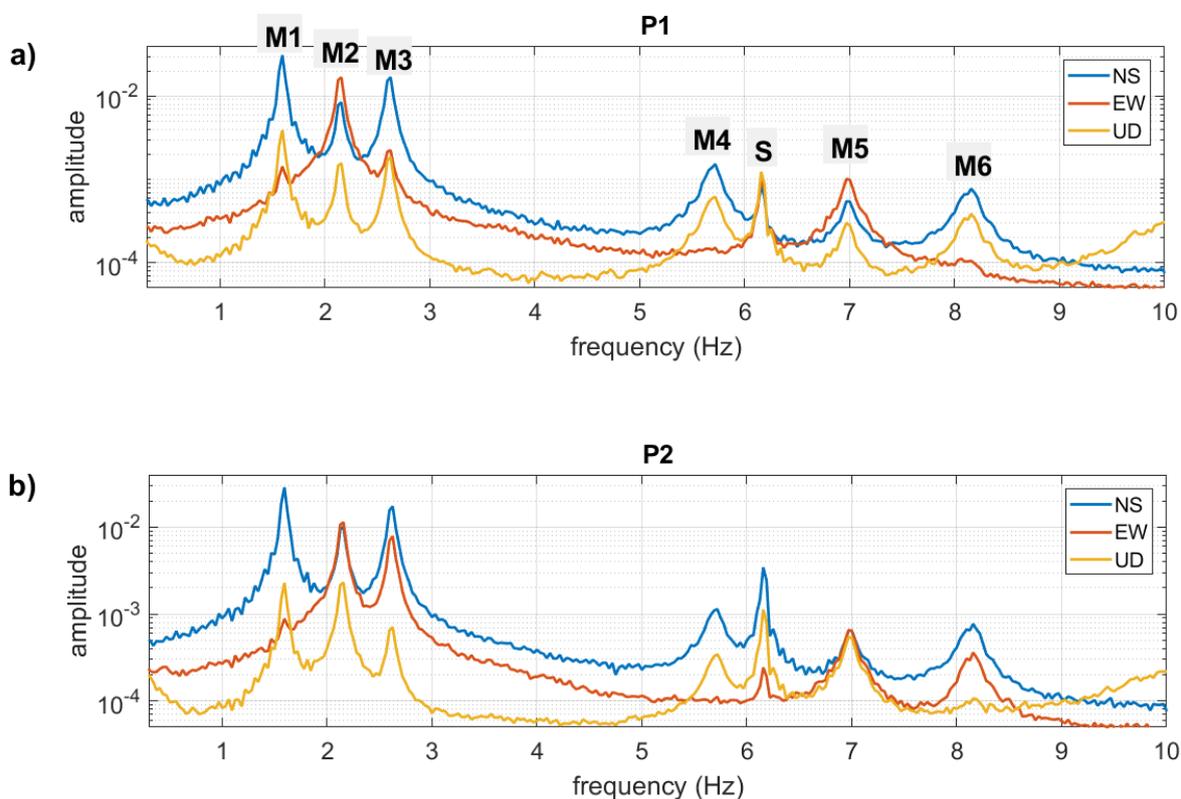


Figura 2: Spettri di ampiezza delle 3 componenti (NS, EO, verticale) per il punto di misura P1 (a) e per il punto P2 (b) sul tetto dell'edificio. Sono chiaramente identificati i segnali relativi alle frequenze 1.6 Hz, 2.16 Hz, 2.63 Hz, 5.72 Hz, 7.00 Hz e 8.16 Hz. Il segnale indicato dalla lettera S si riferisce ad un segnale transitorio (spurio) relativo ad un motore attivatosi per alcuni minuti durante l'acquisizione dei dati.

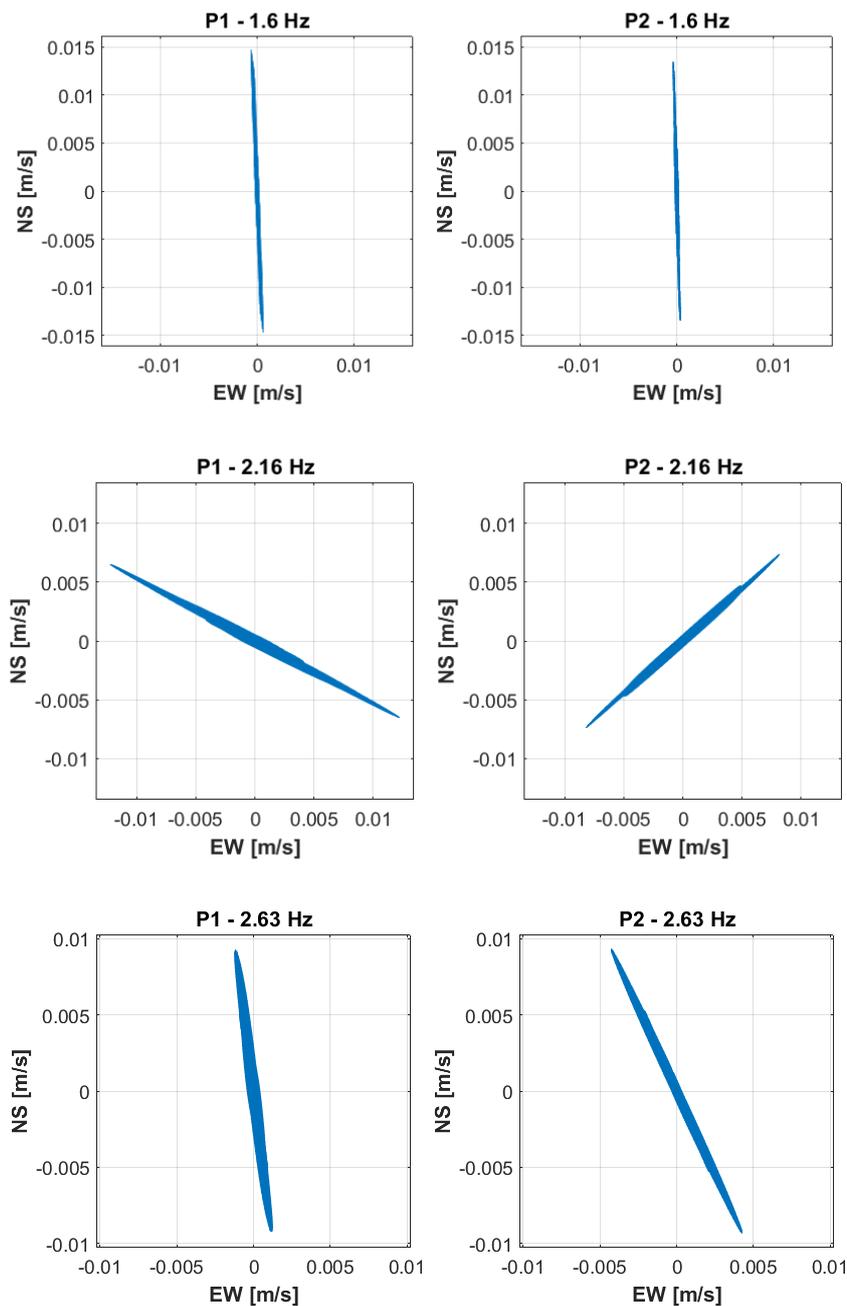


Figura 3: Grafici GHM per i primi tre modi identificati. Dall'alto verso il basso: modo M1 (modo flessionale lungo l'asse NS a 1.60 Hz, 0.625 s); modo M2 (modo torsionale a 2.16 Hz, 0.463 s); modo M3 (modo misto a 2.63 Hz, 0.380 s). La direzione NS coincide con il lato corto dell'edificio (P1 e P2 sono i due punti di misura, agli angoli opposti della copertura dell'edificio).

Conclusioni. Dai risultati presentati appare evidente che il tipo di modellazione scelta dal progettista per valutare la vulnerabilità sismica di un edificio, incide pesantemente sul risultato delle analisi. Pur essendo stata analizzata solamente la fase elastica dell'edificio, quella più semplice da trattare, perché basata su un numero minore di variabili, è possibile verificare come i risultati delle analisi numeriche differiscano dai risultati delle misurazioni. Il periodo fondamentale più basso tra tutti i modelli realizzati, $T = 1.01$ s (N3), resta significativamente maggiore rispetto al più alto periodo misurato (pari a 0.625 s). È possibile ipotizzare che questo sia dovuto al contributo degli elementi non strutturali presenti nell'edificio non inseriti nel modello (ad esempio i tramezzi interni) e alla massa dai carichi

accidentali di progetto che risulterebbe maggiore rispetto a quella reale presente nell'edificio al momento delle misurazioni.

Risulta inoltre fondamentale la differenza tra la modellazione dei setti con elementi *shell* e quella fatta con soli elementi *frame*. I periodi trovati con i due modelli N1 e N2 si differenziano tra loro in modo equiparabile alla differenza verificata tra il modello con tamponamenti (N3) e il modello con soli elementi strutturali (N1). Tale differenza si aggira mediamente attorno al 60% e determina differenze nei tagli alla base sull'ordine del 35%. Per la modellazione di setti in c.a. presenti in strutture esistenti appare dunque raccomandabile l'utilizzo di elementi *shell*. Un'efficace alternativa è l'utilizzo di elementi *frame* collegati tra loro con link rigidi (N5) per farli collaborare simulando una sezione a C.

Risulta inoltre di primaria importanza anche il contributo dei tamponamenti. Come si può notare da Tabella 1, l'inserimento di diagonali equivalenti alle tamponature modifica sostanzialmente non solo i periodi ma anche i modi stessi. Aggiungendo rigidità alla parte di edificio senza setti, le tamponature riescono in parte a controbilanciare la notevole rigidità dei setti del vano scale e quindi a regolarizzare parzialmente i modi di vibrare. Modellare l'edificio con soli elementi *frame*, senza link rigidi e senza tamponamenti porta a sottostimare in modo sostanziale l'azione sismica agente su di esso, in particolare per edifici alti quale quello considerato per il presente studio, per il quale si verifica un taglio alla base fino al 59% inferiore.

Non bisogna infine sottovalutare l'influenza della scelta della rigidità assiale della biella compressa, rappresentativa della muratura di tamponamento, che può avere un'enorme variabilità in base al tipo di mattone considerato. Per questo motivo una opportuna caratterizzazione meccanica del tamponamento e del tipo di collegamento con il telaio risulta fondamentale per una corretta analisi della risposta sismica.

Un professionista al quale sia commissionata la valutazione della vulnerabilità sismica di un edificio simile a quello qui analizzato ed usi una conoscenza limitata (LC1), oppure debba analizzare un edificio irregolare, per cui la Normativa non permetta analisi di *pushover*, sceglierà come modalità di calcolo un'analisi lineare statica o dinamica. In questo caso, per quanto detto, sarà quindi di fondamentale importanza effettuare un'analisi di sensibilità della risposta sulla base del diverso tipo di modellazione strutturale.

Bibliografia

Chen X., Liu Y.; 2015: *The Effect of Openings on the In-Plane Behavior and Strength of Masonry Infills*. Proceedings of the 15th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Civil-Comp Press, Stirlingshire, Scotland, Paper 69.

Dal Moro G., Weber T. M., Keller L.; 2018: [Gaussian-filtered Horizontal Motion \(GHM\) plots of non-synchronous ambient microtremors for the identification of flexural and torsional modes of a building](#). Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **112**, 243-255.

Gerardi V., Ditommaso R., Auletta G., Ponzo F.C.; 2017: *Strutture intelaiate in conglomerato cementizio armato: validazione numerica di due modelli di calcolo finalizzati a portare in conto il contributo irrigidente dei pannelli di tamponatura in condizioni di esercizio*. Proceedings GNGTS 2017, 478-482.

Jalayer F., Iervolino I., Manfredi G.; 2007: *Influenza dei parametri di modellazione e dell'incertezza associata nella valutazione sismica di edifici esistenti in cemento armato*. Proceedings XII Convegno ANIDIS, Giugno 2007.