Modellazione parametrica di pareti a telaio leggero in legno mediante OpenSEES

Giorgia Di Gangi[a], Cristoforo Demartino[b], Giuseppe Quaranta[a], Giorgio Monti[a]
[a] *Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Via Eudossiana 18, 00184 Roma, Italy*
[b] *Zhejiang University / University of Illinois at Urbana Champaign Institute (ZJUI), China*

Keywords: Aperture; connessioni chiodate telaio-pannello; dissipazione energetica; modello a elementi finiti; pareti a telaio leggero in legno.

ABSTRACT
Il presente lavoro intende illustrare un originale modello parametrico agli elementi finiti per supportare lo studio del comportamento di pareti a telaio leggero in legno soggette ad azioni sismiche, ed in particolare la dissipazione energetica legata al danneggiamento delle connesioni chiodate tra i pannelli di irrigidimento ed il telaio principale. Sono anche discussi i risultati di un'ampia analisi di sensitività eseguita con l'obiettivo di valutare le prestazioni sismiche di questo elemento strutturale ed il suo comportamento globale al variare dei parametri di input che maggiormente ne influenzano la racking capacity, ovvero le proporzioni geometriche (in termini di rapporto altezza-base del pannello), il passo orizzontale e verticale dei chiodi, il numero di montanti verticali e le dimensioni delle sezioni trasversali degli elementi del telaio. Il modello proposto consente, inoltre, di tener conto della presenza di aperture e, per pareti con proporzioni ridotte, della presenza di più di un pannello di irrigidimento per lato.

1 INTRODUZIONE

Le pareti in legno a telaio leggero sono elementi strutturali tipicamente impiegati in edifici noti col nome di *platform framing buildings* per resistere ad azioni laterali nel piano, legate al vento od al sisma. Sono particolarmente diffusi in Nord Europa, Nord America e Nuova Zelanda nel 90% degli edifici residenziali ad uno o due piani. Considerando solo la parte strutturale di questi elementi, essi sono realizzati mediante l'assemblaggio di montanti e correnti di sezione ridotta, collegati alle estremità con vincoli generalmente modellati come cerniere. Il telaio è a sua volta irrigidito da pannelli lignei, ad esso collegati con chiodi o viti, su una od entrambe le facciate. Le dimensioni di realizzazione di queste pareti sono condizionate da quelle dei pannelli lignei disponibili sul mercato. Tali pannelli possono essere realizzati in OSB (Oriented Strand Board), multistrato, in fibre ma anche in gesso e bambù. Le dimensioni più comuni di una parete in legno a telaio leggero è di circa 1.22 m × 2.44 m o 2.44 m × 2.44 m, mentre le sezioni trasversali generalmente impiegate per montanti e correnti del telaio, interni ed esterni, sono circa 38 mm × 89 mm e 38 mm × 140 mm rispettivamente, come evidenziato in (Wang et al. 2018). La dimensione delle sezioni trasversali degli elementi perimetrali del telaio è spesso scelta per soddisfare i requisiti minimi per l'isolamento termico delle costruzioni (Figura 1). Per la connessione tra il telaio ed i pannelli di irrigidimento generalmente vengono impiegati chiodi (6D, 8D e 10D) con gambo spesso che conferiscono maggiore resistenza, i quali sono distribuiti sia sugli elementi del telaio

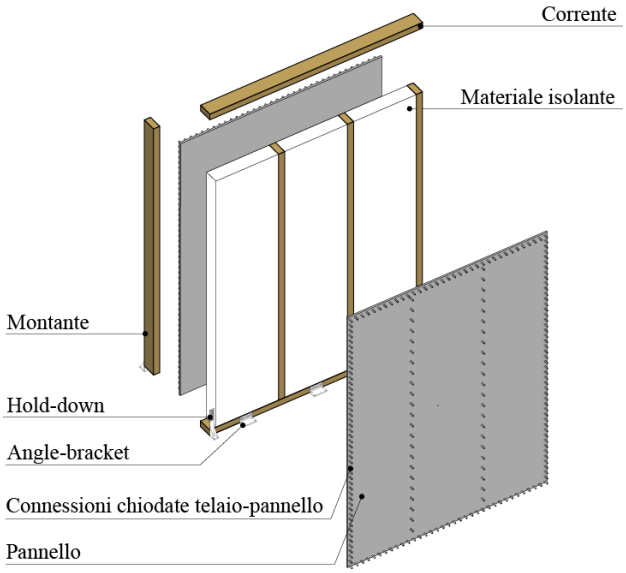

Figura 1. Configurazione strutturale tipica di una parete in legno a telaio leggero irrigidita da pannelli su entrambi i lati.

perimetrali (con passo pari a 50, 75 o 100 mm) che su quelli intermedi, in quest'ultimo caso con passo doppio o triplo rispetto a quello perimetrale. I chiodi sugli elementi intermedi sono infatti impiegati per evitare fenomeni di instabilità dei pannelli di irrigidimento (Källsner e Girhammar 2009).

I test sperimentali finora condotti su questa tipologia strutturale hanno dimostrato che in genere il legno ha una bassa capacità dissipativa mentre le connessioni in acciaio – come quelle di collegamento tra il telaio e i pannelli (Sartori and Tomasi 2013; Humbert et al. 2014; Germano et al. 2015), le connessioni alla base (Gavric et al. 2014) e quelle tra montanti e correnti del telaio (Humbert et al. 2014) – garantiscono una buona dissipazione energetica nonché duttilità ciclica nonostante si verifichino fenomeni di pinching, degrado di resistenza e rigidezza durante il processo deformativo. Tali evidenze sperimentali sono ben rappresentate dai modelli numerici disponibili nella letteratura corrente, in cui la risposta non lineare delle pareti è direttamente correlata alle relazioni sforzo-deformazione delle connessioni (Tuomi e McCutcheon 1978; Gupta e Kuo 1985). Generalmente per rappresentare il comportamento dei montanti e dei correnti del telaio sono utilizzati elementi trave elastici mentre i pannelli di irrigidimento sono modellati con elementi bidimensionali soggetti ad uno stato piano di tensione, con comportamento elastico in compressione ed elasto-fragile in trazione (Gattesco e Boem 2016). Infine, le connessioni chiodate sono comunemente modellate con molle a comportamento non-lineare (Yasumura 2010). L'assenza di analisi parametriche estese e complete per la valutazione del comportamento di pareti in legno a telaio leggero nella letteratura corrente (Salenikovich e Dolan 2000; Dhonju et al. 2017), ha condotto allo sviluppo di un modello parametrico originale ad Elementi Finiti (FE) mediante OpenSEES (Di Gangi 2019), presentato e descritto in questo lavoro nelle sezioni che seguono. Tale modello si è rivelato affidabile per studiare l'influenza che alcune variabili geometriche hanno sulle prestazioni globali di pareti in legno a telaio leggero.

2 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IN OPENSEES

Per quanto risulta agli autori, il modello parametrico FE sviluppato mediante il software open-source OpenSEES (McKenna e Fenves 2001) e presentato in questo lavoro è il primo tentativo di modellazione di una parete in legno a telaio leggero in ambiente TCL.

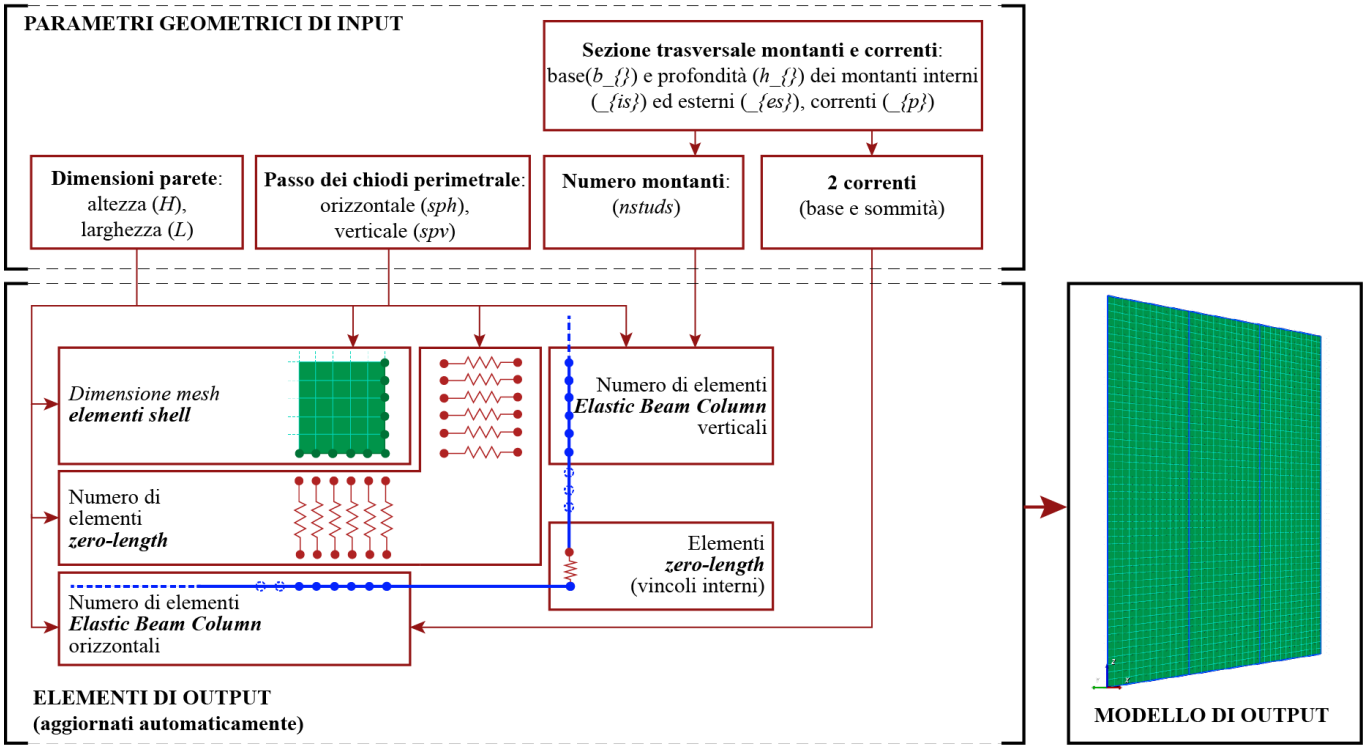

Figura 2. Procedimento per la costruzione del modello FE parametrico di parete senza aperture.

2.1 *Modello FE senza aperture*

Una modalità comune per simulare in modo efficiente il comportamento di pareti in legno a telaio leggero consiste nel modellare il sistema telaio-pannello con elementi elastici e le connessioni chiodate con elementi non lineari privi di dimensioni. Questo approccio è stato già adottato in alcuni studi precedenti (Tuomi e McCutcheon 1978; Gupta e Kuo 1985) ed è implementato in questo lavoro. Il modello parametrico FE richiede la definizione iniziale dei seguenti parametri geometrici (Figura 2): le dimensioni del pannello (in termini di altezza *H* e larghezza *L*), il passo orizzontale e verticale dei chiodi (*sph* e *spv*), il numero dei montanti verticali (*nstuds*) e la dimensione della sezione trasversale dei montanti intermedi (*bis* e *his*) nonché degli elementi perimetrali (cioè *bes* e *hes* per i montanti, *bp* e *hp* per i correnti). I nodi del modello sono generati su una griglia regolare secondo il passo dei chiodi *sph* e *spv*. Sono inoltre identificati con un'etichetta costituita da una prima cifra che denota il layer al quale appartengono e due successive coppie di cifre utili ad indicare l'i-esima (lungo la direzione x) e la j-esima (lungo la direzione z) posizione di tali nodi sulla griglia (Figura 3). I layers definiti per i nodi sono due: il layer 2 include tutti i nodi fittizzi utilizzati per inserire i vincoli cerniera alle estremità dei montanti del telaio, per rappresentare le connessioni interne con i correnti superiore ed inferiore. Il layer 4 include, invece, i nodi perimetrali appartenenti al telaio. Un esempio di modello FE con griglia generata per 5 × 3 nodi è illustrato nella Figura 3, dove la base e l'altezza della parete sono allineate secondo l'asse x e l'asse z, rispettivamente. Una volta posizionati i nodi, anche gli elementi sono generati. In particolare, montanti e correnti del telaio sono stati modellati utilizzando elementi *Elastic Beam Column* mentre i pannelli di irrigidimento con elementi *ShellMITC4*. È utile sottolineare come la dimensione della mesh venga aggiornata automaticamente secondo il passo dei chiodi. Inoltre, per modellare correttamente il collegamento tra montanti e correnti del telaio a mezzo di cerniere (Yasumura 2010), sono stati inseriti elementi *ZeroLength* su entrambe le estremità dei montanti. Tali elementi sono caratterizzati da un valore di rigidezza pari a zero per la rotazione attorno all'asse y, e pari ad infinito per i restanti gradi di libertà. Infine, per rappresentare il comportamento non lineare delle

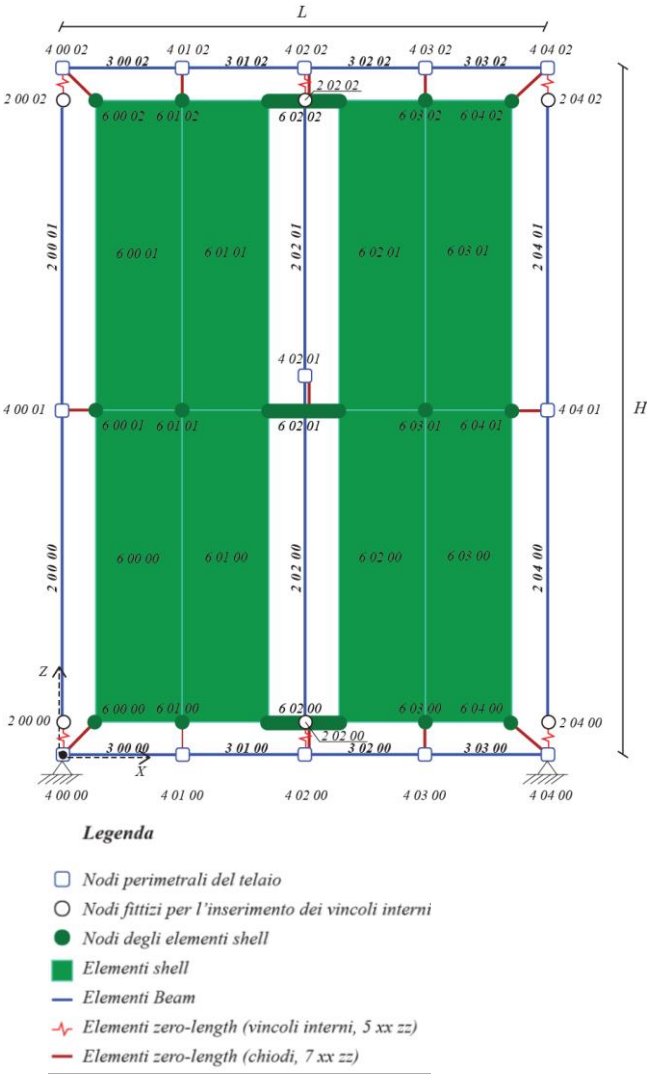

Figura 3. Schema del modello FE di parete implementato mediante OpenSEES (in questo esempio è stata generata una griglia 5 × 3 nodi).

connessioni chiodate telaio-pannello, sono stati utilizzati elementi *CoupledZeroLength*, i quali consentono di evitare la sovrastima della rigidezza e della resistenza del chiodo: lo snervamento dell'elemento sottoposto a carico non lineare si verifica, infatti, su una superficie circolare (Casagrande et al. 2016). Come per i nodi, ciascun elemento è identificato considerando il layer a cui appartiene (prima cifra dell'etichetta) e la sua posizione lungo l'asse x e l'asse z, rispettivamente (successive due coppie di cifre), come illustrato in Figura 3.

I layers 2, 3, 5, 6 e 7 includono rispettivamente: i montanti, i correnti, le cerniere di collegamento all'interno del telaio, i pannelli (e loro nodi) e le connessioni chiodate telaio-pannello. Infine, dato che il telaio è, nel caso studiato, irrigidito su entrambe le facciate (Figura 1), i layers 8 e 9 contengono i nodi e gli elementi generati per tener conto dei chiodi e del pannello simmetrici a quelli precedentemente descritti.

Per simulare il comportamento di un chiodo singolo è stato, infine, utilizzato il modello meccanico *SAWS*, originariamente proposto in (Foschi 1974), poi sviluppato in (Folz e Filiatrault 2001) e modificato in (Dolan 1989). I 10 parametri del modello sono stati identificati (Figura 4) considerando i dati sperimentali riferiti ad un chiodo tipo *ring* Φ 2.8/70 forniti in (Gattesco e Boem 2016) utilizzando tecniche di identificazione non classiche presentate in (Quaranta et al. 2010). Per ulteriori dettagli sul modello FE e sulla sua validazione, il lettore può riferirsi a (Di Gangi et al. 2018).

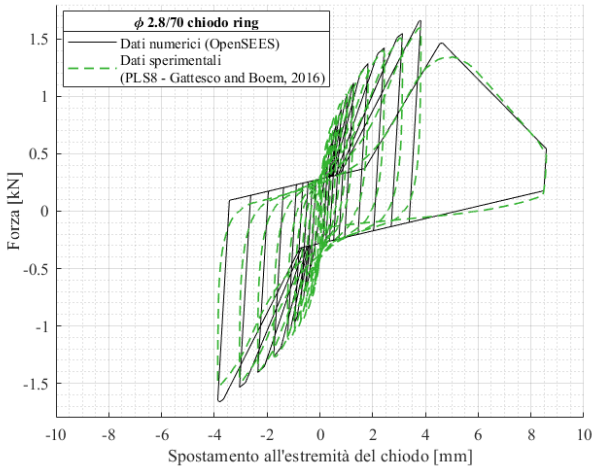

Figura 4. Identificazione parametrica del modello meccanico SAWS per le connessioni chiodate telaio-pannello: confronto tra le curve sperimentale e numerica dopo la stima dei parametri.

2.1.1 Risultati delle analisi di sensitività

In questa sezione sono discussi i risultati delle analisi di sensitività, in particolare l'incidenza che ciascun parametro geometrico ha sulla risposta globale di una parete in legno a telaio leggero. I parametri geometrici considerati nelle analisi sono: i) le proporzioni geometriche in termini di rapporto altezza-base della parete α; ii) il passo orizzontale e verticale dei chiodi; iii) il numero dei montanti verticali; iv) la dimensione della sezione trasversale degli elementi del telaio. La variazione di $\alpha = \{0.7, 1, 1.4\}$ è ottenuta variando la base del pannello $L = \{3.7, 2.6, 1.8\}[m]$ e mantenendo costante l'altezza della parete $H = \{2.6\}[m]$. Come mostrato in Figura 5a, la variazione delle proporzioni geometriche, in particolare la diminuzione di α, comporta un incremento della resistenza e della rigidezza globale della parete ed una diminuzione della sua duttilità. L'incremento del passo dei chiodi da 50 mm a 100 mm dimezza sia la resistenza che la rigidezza della parete, come mostrato in Figura 5b. In particolare, il decremento di resistenza è dovuto al minor numero di chiodi sugli elementi del telaio perimetrali che rendono l'intero sistema strutturale più flessibile e capace di sopportare azioni ridotte.

La Figura 5c mostra che l'incremento del numero di montanti verticali conduce ad un lieve aumento sia della resistenza che della rigidezza della parete. Ciò si verifica per il complessivo numero maggiore di chiodi verticali, ottenuto aggiungendo quelli sui montanti intermedi, che ha comunque effetti limitati sulla resistenza globale: di fatto solo i chiodi perimetrali contribuiscono in modo sostanziale alla risposta complessiva del sistema strutturale, in termini di dissipazione energetica, mentre gli altri rimangono in campo elastico. Infine, le dimensioni della sezione trasversale dei montanti e dei correnti del telaio considerate nelle analisi sono quelle comunemente usate nella pratica costruttiva e pari

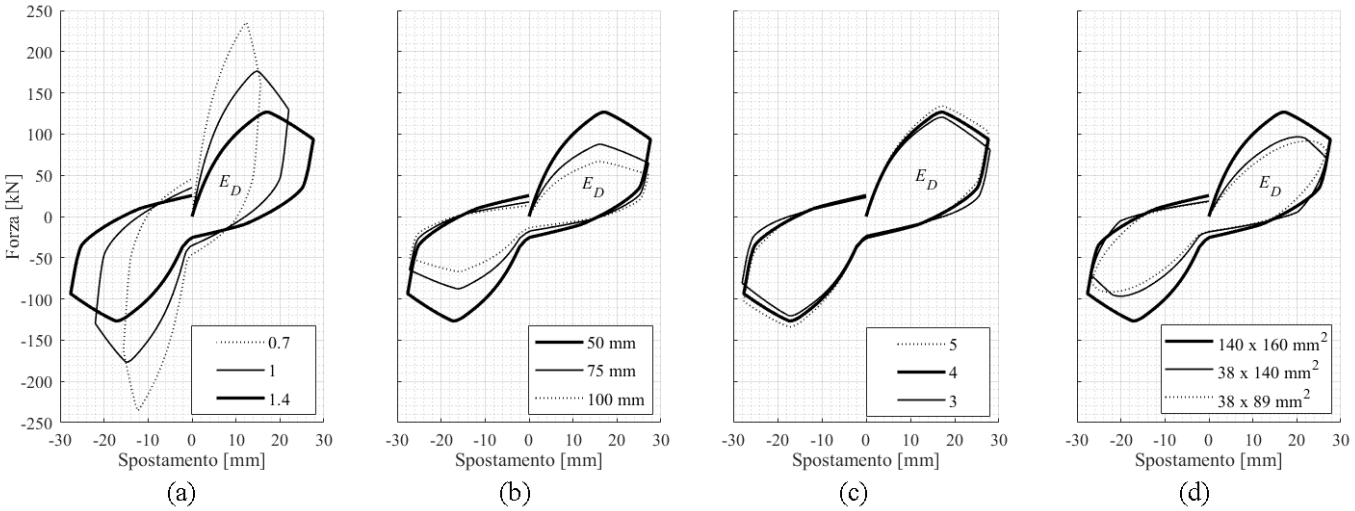

Figura 5. Influenza delle proporzioni geometriche (rapporto altezza-base α) (a), del passo orizzontale e verticale dei chiodi (b), del numero di montanti verticali (c) e della dimensione della sezione trasversale degli elementi del telaio (d) sulla risposta in termini di forza-spostamento globali della parete.

a 38 mm × 89 mm, 38 mm × 140 mm, 140 mm × 160 mm, queste ultime appartenenti alla configurazione di riferimento (campione PLS8 in Gattesco e Boem 2016).

I risultati in Figura 5d mostrano un incremento di rigidezza e resistenza all'aumentare della dimensione della sezione trasversale di montanti e correnti. Ciò è attibuibile alla compatibilità cinematica tra il comportamento di taglio puro degli elementi del telaio ed il comportamento del pannello, che ruota rigidamente rispetto al telaio ed è soggetto ad azioni di taglio e flessione. La rigidezza relativa nel piano è cruciale per determinare il livello di sforzo nei chiodi. Le configurazioni in cui le connessioni chiodate sono meno sollecitate sono quelle in cui o il pannello o il telaio segue la deformazione imposta dall'altro elemento. Viceversa, se la dimensione della sezione trasversale degli elementi del telaio e lo spessore del pannello sono tali da garantire notevoli spostamenti relativi, i chiodi sfruttano la loro massima deformazione plastica e la quantità massima di energia potenziale globale viene dissipata.

2.2 *Modello FE con aperture*

Per tenere conto della presenza di aperture in una parete in legno a telaio leggero è stata implementata anche la versione di modello FE descritta di seguito (Figura 7). Fissate le dimensioni delle aperture (in termini di base *bdim* e altezza *hdim*) e la loro distanza dal bordo della parete (*dist*), la posizione dei montanti intermedi ad esse adiacenti e dell'architrave è aggiornata automaticamente. Quest'ultimo è poi connesso al telaio con vincoli interni che simulano il reale comportamento a cerniera delle connessioni tra gli elementi del telaio. Infine, per mezzo del comando *remove*, i nodi e gli elementi shell ricompresi nelle dimensioni dell'apertura vengono automaticamente rimossi. Per validare la capacità predittiva del modello FE per pareti in legno a telaio leggero con aperture, sono stati considerati i dati sperimentali forniti in (Togay et al. 2017) per il campione 2.

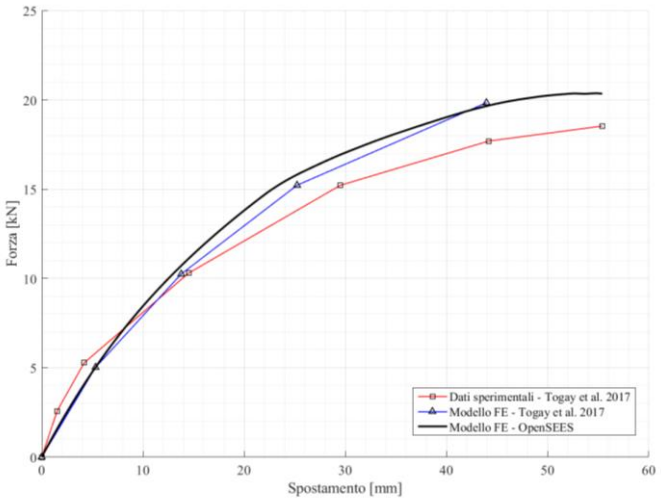

Figura 6. Confronto tra le curve forza-spostamento sperimentale e numeriche per la configurazione di parete di riferimento (campione 2 in Togay et al. 2017).

Come mostrato in Figura 6, la curva forza-spostamento ottenuta col modello in OpenSEES

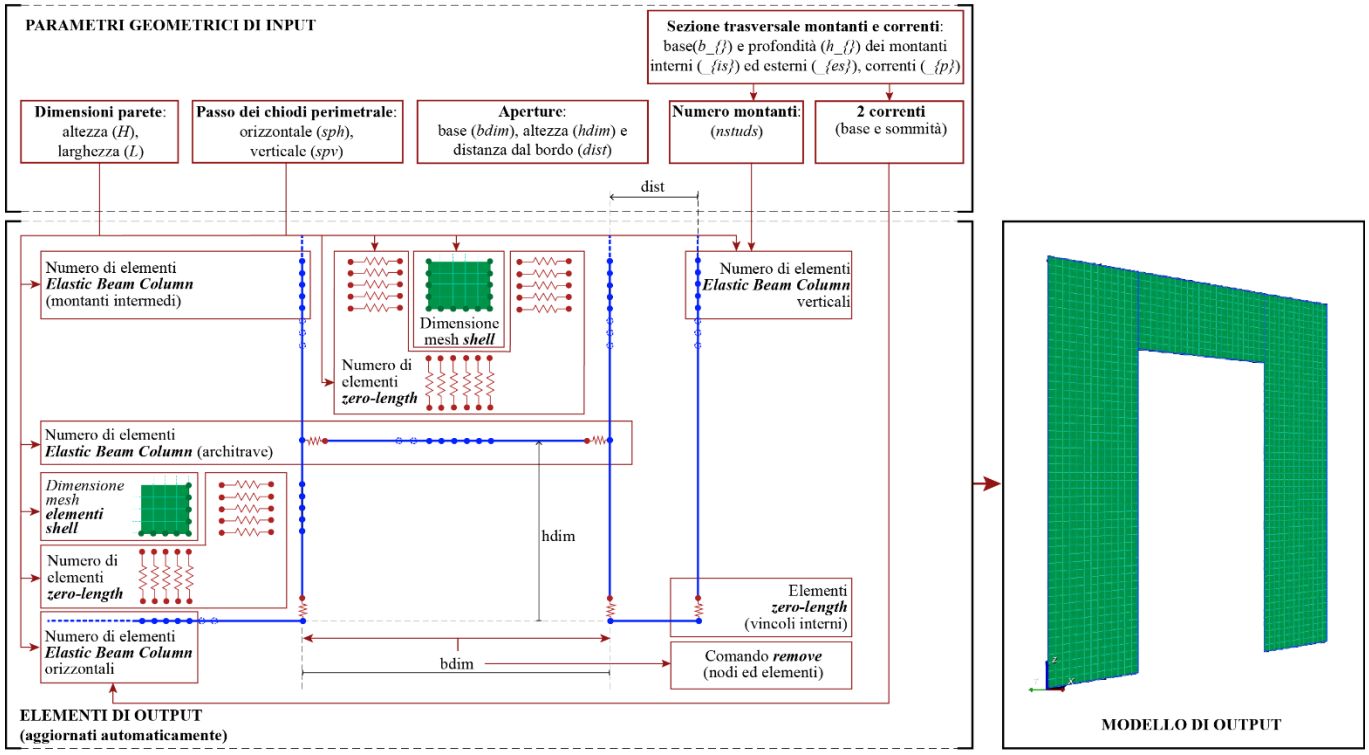

Figura 7. Procedimento per la costruzione del modello FE parametrico di parete con aperture.

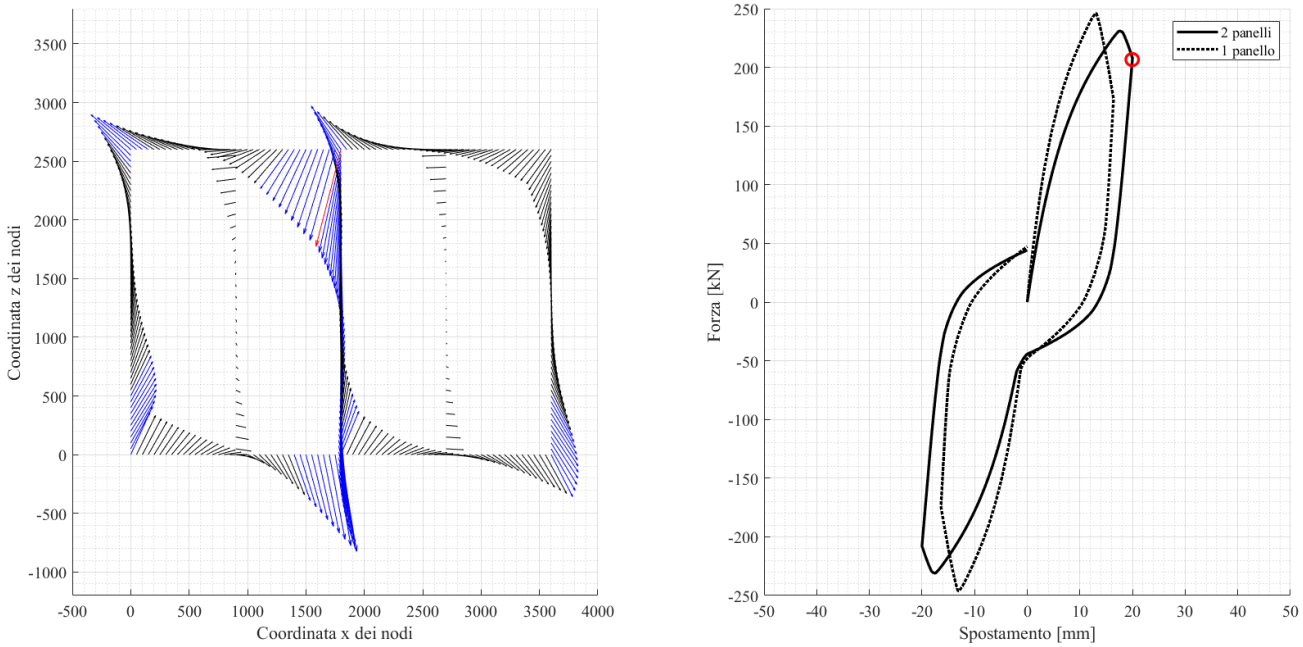

Figura 8. Curva forza-spostamento globale di una parete con rapporto altezza-base pari a 0.7 (destra) considerando due pannelli adiacenti per entrambe le facciate della parete. Il campo di spostamenti è amplificato con un fattore di scala uguale a 100 (sinistra); vettore nero: spostamento dei chiodi inferiore a quello corrispondente al picco di resistenza; vettore blu: spostamento dei chiodi maggiore di quello corrispondente al picco di resistenza; vettore rosso: spostamento ultimo del chiodo.

(linea nera) è in buon accordo con i dati sperimentali (linea rossa) ed i risultati numerici (linea blu) forniti in (Togay et al. 2017).

Nel modello adottato, le dimensioni degli elementi shell è di 50 mm × 50 mm mentre il passo dei chiodi – in accordo con quando riportato in (Togay et al. 2017) – è 100 mm sui bordi esterni e 300 mm sugli elementi orizzontali della sezione centrale. Nessuna variazione significativa è osservata al variare della dimensione della mesh (infittita) per gli elementi shell. Per simulare il comportamento delle connessioni chiodate Φ 3.1 (mm) – impiegate nel campione di parete 2 in (Togay et al. 2017) per collegare i pannelli in OSB al telaio – ed in mancanza di dati sperimentali su tali connessioni, la curva forza-spostamento riferita ad un singolo chiodo è stata ottenuta moltiplicando per 1.08 le ordinate della curva sperimentale riferita a un chiodo tipo *ring* Φ 2.8, seguendo la procedura illustrata in (Gattesco e Boem 2016). In particolare, il fattore di amplificazione è stato stimato come il valore medio tra il rapporto di resistenza e rigidezza dei due chiodi, sfruttando la relazione analitica proposta dall'Eurocodice 5 (EN 1-1:2004) per predire la rigidezza delle connessioni legno-legno, considerando chiodi senza preforatura:

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1.5} \cdot d^{0.8}}{30} \Rightarrow \frac{K_{ser,\phi 3.1}}{K_{ser,\phi 2.8}} = \left(\frac{\phi 3.1}{\phi 2.8}\right)^{0.8} \quad (1)$$

dove ϕ rappresenta il diametro del chiodo.

3 ANALISI DI PARETI CON PROPORZIONI RIDOTTE

La risposta di pareti in legno a telaio leggero parzialmente ancorate e non ancorate dipende fortemente dalle proporzioni della parete (in termini di rapporto altezza-base α) così come evidenziato in (Salenikovich e Dolan 2000).

La rotazione relativa tra il telaio ed il pannello di irrigidimento, come già osservato sperimentalmente, sollecita maggiormente i chiodi angolari. Quando la base della parete è molto minore della sua altezza (cioè quando il rapporto altezza-base della parete è maggiore o uguale a 3) il comportamento osservato nei test sperimentali presentati in (Anil et al. 2017) è di tipo flessionale, viceversa il contributo della deformazione tagliante allo spostamento di piano cresce, così come accade per la rigidezza e la resistenza della parete considerata. Tale comportamento è ascrivibile a due fattori e cioè: i) per pareti più lunghe è necessario l'inserimento di un numero maggiore di montanti verticali; ii) più lunga è la base della parete, maggiore è il numero di chiodi orizzontali di collegamento telaio-pannello. Per quanto riguarda i chiodi di collegamento telaio-pannello posizionati sui montanti intermedi di cui al punto i): pur non fornendo un contributo sostanziale alla deformazione della parete, provocano un lieve incremento di rigidezza e resistenza (Figura 5c). In riferimento

all'incremento dei chiodi orizzontali di cui al punto ii): come evidenziato dall'equazione proposta dall'Eurocodice 5 (EN 1-1:2004) per il calcolo della *racking capacity*, tale incremento provoca un sostanziale aumento della resistenza della parete. Inoltre, pareti con ridotti valori di α, sono spesso irrigidite con più di un pannello per ciascuna facciata, a causa delle dimensioni ridotte di pannello disponibili sul mercato. Per quantificare la differenza in termini di risposta meccanica della parete al variare del numero di pannelli per ciascun lato, è stata implementata mediante OpenSEES un'ulteriore versione di modello FE. I risultati (Figura 8) mostrano una variazione della rigidezza globale della parete, legata alla riduzione dell'inerzia dei pannelli per azioni nel piano. Effetti trascurabili sono invece osservati per la variazione della resistenza globale.

4 CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato presentato un modello parametrico originale FE riferito a pareti in legno a telaio leggero. In primo luogo è stata descritta una versione del modello senza la presenza di aperture, mostrando i risultati riferiti ad un'ampia analisi di sensitività volta a valutare l'incidenza di ciascuna variable geometrica di input sulla risposta globale della parete. Inoltre è stata presentata una versione di modello FE che tiene conto della presenza di aperture ed, infine, un'ulteriore versione che consente di inserire più di un pannello di irrigidimento su ciascuna facciata della parete. I risultati preliminari e le validazioni hanno dimostrato l'affidabilità del modello, che può quindi essere impiegato per effettuare analisi parametriche estese e supportare la ricerca di configurazioni ottime.

5 REFERENCES

Anil, Ö., Togay, A., Işleyen, Ü. K., Döngel, N., Söğütlü, C., 2017. Effect of timber type and nail spacing on the hysteretic behavior of timber-framed shear walls with openings, *International Journal of Civil Engineering*, **16**(6), 629-646.

Casagrande, D., Rossi, S., Tomasi, R., Mischi, G., 2016. A predictive analytical model for the elasto-plastic behaviour of a light timber-frame shear-wall, *Construction and Building Materials*, **102**, 1113-1126.

Dhonju, R., D'Amico, B., Kermani, A., Porteous, J., Zhang, B., 2017. Parametric evaluation of racking performance of platform timber framed walls, *Structures*, **12**, 75-87.

Di Gangi, G., Demartino, C., Quaranta, G., Vailati, M., Monti, G., 2018. Timber shear walls: numerical assessment of the equivalent viscous damping. *9th international conference on computational methods*, ICCM2018. August 6th-10th, Rome, Italy.

Di Gangi, G., 2019. Structural Analysis and Design of Timber light-frame shear walls, *PhD thesis*, Sapienza University of Rome.

Dolan, J.D., 1989. The dynamic response of timber shear walls, *PhD thesis*, University of British Columbia.

EN 1-1: 2004. Eurocode 5: Design of timber structures – General – Common rules and rules for buildings, 1995.

Folz, B., Filiatrault, A., 2001. Cyclic analysis of wood shear walls, *Journal of Structural Engineering*, **127**(4), 433-441.

Foschi, R.O., 1974. Load-slip characteristics of nails, *Wood Sci*, 69-76.

Gattesco, N., Boem, I., 2016. Stress distribution among sheathing-to-frame nails of timber shear walls related to different base connections: experimental tests and numerical modelling, *Construction and Building Materials*, **122,** 149-162.

Gavric I., Fragiacomo M., Ceccotti A., 2014. Cyclic behaviour of typical metal connectors for cross-laminated (CLT) structures, *Materials and structures*, **48**(6), 1841-1857.

Germano, F., Metelli, G., Giuriani, E., 2015. Experimental results on the role of sheathing-to-frame and base connections of a European timber framed shear wall, *Construction and Building Materials*, **80**, 315-328.

Gupta, A.K., Kuo, G.P., 1985. Behavior of wood-framed shear walls, *Journal of Structural Engineering*, **111**(8), 1722-1733.

Humbert, J., Boudaud, C., Baroth, J., Hameury S., Daudeville, L., 2014. Joints and wood shear walls modelling I: constitutive law, experimental tests and FE model under quasi-static loading, *Engineering Structures*, **65**, 52-61.

Källsner, B., Girhammar, U.A., 2009. Analysis of fully anchored light-frame timber shear walls-Elastic model, *Materials and Structures*, **42**(3), 301-320.

McKenna, F., Fenves, G., 2001. The OpenSees Command Language Manual: version 1.2, *Pacific Earthquake Engineering Center*, Univ. of Calif., Berkeley, USA.

Quaranta, G., Monti, G., Marano, G. C., 2010. Parameters identification of Van der Pol-Duffing oscillators via particle swarm optimization and differential evolution, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **24**(7), 2076-2095.

Salenikovich, A., Dolan, J. D., 2000. The racking performance of light-frame shear walls with various tie-down restraints. *6th World Conference on Timber Engineering*, July.

Sartori, T., Tomasi, R., 2013. Experimental investigation on sheathing-to-framing connections in wood shear walls, *Engineering Structures*, **56**, 2197-2205.

Togay, A., Anil, Ö., Karagöz Işleyen, Ü., Ediz, İ., Durucan, C., 2017. Finite-element analyses of light timber-framed walls with and without openings, *Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, **170**(8), 555-569.

Tuomi, R.L., McCutcheon, W.J., 1978. Racking strength of light-frame nailed walls, *Journal of the Structural Division*, **104**(7), 1131-1140.

Wang, J., Demartino, C., Xiao, Y., Li, Y., 2018. Thermal insulation performance of bamboo- and wood-based shear walls in light-frame buildings, *Energy and Buildings*, **168**, 167-179.

Yasumura, M., 2010. Racking resistance of panel-sheathed shear walls with openings. *World Conference on Timber Engineering, WCTE*. Riva del Garda, Trentino, Italy.