



## Periodo fondamentale di edifici X-Lam: analisi dinamiche elastiche-non lineari di tipo incrementale con input sismico a frequenza variabile

Stefano Pacchioli<sup>a,b</sup>, Luca Pozza<sup>d</sup>, Daniele Casagrande<sup>a</sup>, Andrea Polastri<sup>a</sup>,

<sup>a</sup> Istituto per la Bioeconomia - Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IBE)

<sup>b</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali – Università di Bologna (UNIBO)

*Keywords: Cross-laminated timber (CLT), connessioni, progettazione, sismica, periodo*

### ABSTRACT

The evaluation of the proper period of vibration is one of the crucial issues in the analysis and seismic design of buildings and is influenced by a number of variables contributing in the definition of the global rigidity and therefore the seismic susceptibility of the structure. In the case of multi-storey X-Lam buildings connection elements play a key role since they are responsible of most of the dissipative and deformative capacity of the structure. The present work aims to investigate the influence of the connection elements typically used to avoid the rocking of the seismic-resistant walls (i.e. hold-down elements) on the fundamental period of multi-storey X-Lam buildings. A nonlinear numerical model capable of faithfully reproducing the rocking behavior of X-Lam wall system (i.e. accounting for the interaction between the vertical applied loads and the hold-down connection activation) is developed and validated on experimental dynamic tests. The model is used to assess the principal vibration period of a selected case study by means of incremental dynamic analyses. Results from the experimental tests and from the performed analyses demonstrate that when the X-Lam wall system is subjected to significant vertical loads (capable of avoiding the overturning of the walls) the principal vibration period is not affected by the connection stiffness. On the contrary, when negligible vertical loads are applied to the X-Lam wall the principal vibration period is controlled by the hold-down connection stiffness. Finally, the numerical model is also used to characterize the principal vibration period of the case study at different level of the top-displacement adopting seismic input with variable frequency. Results from numerical analyses confirm the strong correlation between the value of principal vibration period and the phenomenon of hold-down connection activation showing an increase of the period increasing the top building displacement.

### 1 INTRODUZIONE

Le strutture a pannelli lignei con tavole incrociate (X-Lam) hanno acquisito negli ultimi anni un ruolo significativo nell'ambito delle costruzioni multi-piano. Leggerezza, elevate prestazioni strutturali e rapidità nelle operazioni di montaggio sono solo alcune delle peculiarità che contraddistinguono questa tipologia strutturale.

La resistenza nei confronti dei carichi orizzontali degli edifici in X-Lam è affidata alle pareti strutturali collegate alle strutture di fondazione, alle pareti adiacenti e ai moduli di solaio mediante opportuni sistemi di collegamento.

Lo studio del comportamento strutturale degli edifici in X-Lam è relativamente recente e numerosi sono ancora gli aspetti oggetto di studio

soprattutto in ambito sismico (Izzi et al., 2018). La campagna sperimentale condotta dal CNR-Ivalsa all'interno del progetto SOFIE (Ceccotti, 2008, Ceccotti et al., 2013, Gavric et al., 2015) ha permesso di evidenziare le peculiarità del sistema strutturale a pareti in X-Lam, soprattutto in caso di azione sismica. Interessanti studi sono stati condotti anche presso l'Università di Ljubljana, Slovenia, (Hristovski et al., 2013) e da FPInnovations, Canada, (Popovski et al., 2014) al fine di investigare il comportamento di pareti in X-Lam soggette a carichi orizzontali sia mediante test sperimentali che analisi numeriche. La caratterizzazione dei meccanismi di collasso dei sistemi con pareti portanti in X-Lam è stata presentata da Pozza e Scotta (2014) mentre estese campagne sperimentali sono state condotte

all'Università di Trento (Tomasi e Smith, 2015, Casagrande et al., 2016a) e all'università di Bologna (Pozza et al., 2018a, Pozza et al., 2018b) al fine di determinare il comportamento meccanico di differenti sistemi di connessione.

Analisi di tipo non lineare sono state effettuate al fine di determinare il fattore di comportamento degli edifici in X-Lam (Rinaldin et al., 2013, Dujic et al., 2010, Pei et al., 2013). In Pozza et al. (2017) e Polastri&Pozza (2016) sono state presentate alcune proposte per la modellazione ed analisi sismica degli edifici multipiano in X-Lam con particolare attenzione allo studio delle proprietà dinamiche ed alla valutazione del periodo fondamentale  $T_1$ . La determinazione del periodo fondamentale delle strutture rappresenta infatti un aspetto cruciale nell'analisi del comportamento sismico (Lucisano et al., 2016), in quanto a tale parametro risulta correlata l'entità delle azioni sismiche sulla struttura.

## 2 LA RIGIDEZZA DEGLI ELEMENTI HOLD-DOWN NELLA VALUTAZIONE DEL PERIODO FONDAMENTALE

La valutazione della rigidezza nei confronti dei carichi orizzontali, e dunque in maniera diretta anche del periodo fondamentale  $T_1$  di una struttura in X-Lam, è strettamente correlata alla rigidezza dei sistemi di collegamento. A tali sistemi è infatti generalmente associato un contributo alla flessibilità globale della struttura tipicamente di gran lunga superiore a quello derivante dai pannelli in X-Lam.

Nel caso di edifici tra 3 e 5 piani, in particolare, è stato evidenziato come il contributo più significativo alla deformabilità globale sia correlato ai sistemi di collegamento utilizzati al fine di evitare il ribaltamento delle pareti - elementi hold-down. La definizione della rigidezza di tali elementi e l'implementazione di opportuni modelli di analisi in grado di considerare correttamente il loro contributo deformativo, rappresentano due aspetti fondamentali per la determinazione delle proprietà dinamiche degli edifici multipiano in X-Lam (Pozza et al., 2015).

Uno studio preliminare per la valutazione del contributo deformativo relativo agli elementi hold-down su una singola parete in X-Lam è stato presentato da Casagrande et al. (2016b), sottolineando il ruolo significativo dei carichi

verticali sulla rigidezza globale della parete. In particolare, è stato evidenziato come nel caso in cui il contributo stabilizzante al ribaltamento derivante dai carichi verticali risulti superiore al contributo ribaltante derivante dal carico orizzontale, gli elementi hold-down non sono soggetti ad alcuna forza di trazione (hold-down non "attivi"). In tal caso, il contributo deformativo correlato al ribaltamento della parete non deve essere considerato. Al contrario, in presenza di carichi verticali di entità trascurabile (es. pareti non aventi funzione portante nei confronti dei carichi gravitazionali), le pareti sono caratterizzate da una rotazione rigida. La deformabilità degli elementi hold-down, che in questo caso risultano soggetti ad una forza di trazione, deve essere dunque tenuta in conto nella valutazione della rigidezza globale della parete stessa (hold-down "attivi"). È importante sottolineare come, in relazione all'elevata flessibilità che contraddistingue solitamente gli elementi hold-down, considerare o meno il loro contributo, in relazione all'entità dei carichi verticali, può comportare notevoli differenze in termini di rigidezza della parete.

Tali differenze divengono ancora più significative nel caso sia necessario effettuare analisi dinamiche modali per la determinazione delle proprietà dinamiche, e le forze sismiche di progetto ad esse correlate, su un'intera struttura.

In questo articolo si presentano i risultati derivanti da analisi numeriche volte alla valutazione delle proprietà dinamiche di edifici multi-piano in X-Lam in relazione al reale contributo di flessibilità degli elementi hold-down. Analisi Dinamiche Elastiche-non Lineari di tipo incrementale con input sismico a frequenza variabile sono state condotte su un caso studio al fine di determinare l'effettiva "attivazione" degli hold-down in relazione della frequenza propria ed ampiezza dell'input sismico nonché dell'entità del carico verticale agente sulla parete. I risultati ottenuti dalle analisi numeriche sono stati validati con un test sperimentale dinamico su un prototipo di edificio ad un piano controventato con pareti X-Lam.

## 3 ANALISI DINAMICHE ELASTICHE-NON LINEARI DI TIPO INCREMENTALE CON INPUT SISMICO A FREQUENZA VARIABILE

La valutazione dell'attivazione degli elementi hold-down nel calcolo del periodo fondamentale

degli edifici multi-piano in X-Lam è stata effettuata mediante analisi dinamiche con segnali di input, in termini di accelerazione  $a(t)$  al suolo, di tipo sinusoidale:

$$a_g(t) = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

dove  $A$  ed  $f$  rappresentano rispettivamente ampiezza e frequenza del segnale.

Per ciascuna analisi è stata determinata la risposta a regime in termini di spostamento di un prefissato punto di controllo che, in relazione alla tipologia del segnale di input, risulta anch'essa di tipo sinusoidale:

$$d(t) = D \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

Ripetendo la medesima analisi con differenti segnali di input caratterizzati dalla stessa ampiezza  $A$  ma differenti valori di frequenza  $f$ , è possibile determinare la frequenza propria  $f_1$  della struttura in corrispondenza del valore massimo dell'ampiezza  $D$  relativi alla condizione di risonanza della struttura.

A differenza delle analisi modali, basate su un calcolo lineare degli autovalori ed autovettori del sistema strutturale in relazione alle matrici massa e rigidezza, tale procedura di analisi permette di considerare intrinsecamente la non linearità degli elementi hold-down in relazione o meno alla loro "attivazione" per effetto del contributo stabilizzante dei carichi verticali. Pur assumendo un comportamento elastico dei pannelli X-Lam e delle connessioni, è necessario infatti effettuare un'analisi di tipo non lineare che consideri il contributo di flessibilità degli elementi hold-down solamente quando soggetti ad un'azione di trazione.

Poiché l'attivazione o meno degli hold-down è correlata al rapporto fra l'entità dei carichi verticali e delle azioni orizzontali sulle pareti, le analisi dinamiche elastiche non lineari devono essere ripetute per valori incrementali delle ampiezze  $A$  del segnale di input. Per ciascuna analisi si ricavano dunque, secondo la procedura precedentemente descritta, la frequenza propria della struttura  $f_1$  (e dunque il periodo fondamentale) e il valore dell'ampiezza  $D(f=f_1)$  della risposta relativa alla condizione di risonanza.

Dalla relazione che intercorre fra la frequenza propria  $f_1$  (o del periodo fondamentale  $T_1$ ) ed il valore dell'ampiezza  $D(f=f_1)$  relativa alla condizione di risonanza è possibile valutare dunque l'influenza dell'"attivazione" degli elementi hold-down sulla rigidezza globale, e dunque sulle proprietà dinamiche, della struttura. In presenza di carichi verticali, è possibile

osservare un incremento del periodo fondamentale  $T_1$  al crescere dell'ampiezza  $D(f=f_1)$  della risposta della struttura relativa alla condizione di risonanza. Poiché l'incremento dell'ampiezza  $D(f=f_1)$  è correlato all'incremento dell'ampiezza dei segnali di input al suolo, la variazione del periodo fondamentale  $T_1$  è associata alla variazione dell'intensità dell'azione sismica.

In assenza di carichi verticali, al contrario, gli hold-down risultano attivi anche per ampiezze ridotte dell'input sismico al suolo e per tale ragione è possibile osservare come il valore del periodo fondamentale  $T_1$  rimanga pressochè costante al variare dell'ampiezza  $D(f=f_1)$  della risposta della struttura relativa alla condizione di risonanza.

### 3.1 Definizione del caso studio

Per valutare la variazione del primo periodo fondamentale legata all'attivazione o meno dei connettori resistenti a trazione si è scelto di applicare l'analisi dinamica elastica- non lineare di tipo incrementale con input sismico a frequenza variabile ad un caso studio. Nel dettaglio si sono implementate in SAP2000 analisi numeriche agli elementi finiti su una parete in X-Lam di lunghezza pari a 3 metri, ed altezza pari a tre piani. Si è ipotizzato uno spessore delle pareti in X-Lam pari a 100 mm e un carico verticale agente ad ogni piano pari a 11.5 kN/m. Quest'ultimo concorre, assieme alla massa della parete assunta pari a 4,5 kN ad ogni piano, a definire la massa sismica del caso studiato. Per quanto riguarda i connettori metallici previsti si sono impiegati hold-down del tipo WHT 340 e squadrette a taglio del tipo TCF200 (piano terra) e TTF 200 (piani superiori). Per la determinazione delle rigidezze da assegnare ai connettori, si fa riferimento alle rigidezze desunte da test sperimentali (Casagrande et al., 2016a) e riportate in Tabella 1.

Tabella 1. Resistenze e rigidezze connettori metallici.

Connettor	$F_{max}$	$K_{ser}$
e	[kN]	[N/mm]
	]	
TCF_200	41.0	8479
	3	
TTF_200	70.0	8945
	4	
WHT340	60.1	5705
	9	

La disposizione dei connettori è stata assunta regolare lungo l'altezza della parete, in particolare si sono posizionati due hold-down WHT340 alle estremità, e 2 squadrette a taglio (TCF 200, al piano terra, TTF 200 ai piani superiori) ai bordi inferiori. Tali connettori sono stati implementati nel modello agli elementi finiti con molle lineari con comportamento uniassiale, nel dettaglio agli hold-down è stata assegnata la sola rigidezza a trazione e alle squadrette la sola rigidezza a taglio. Per simulare il contatto tra pannello-fondazione e pannello-pannello si sono impiegate molle resistenti a sola compressione di tipo GAP (Figura 1).

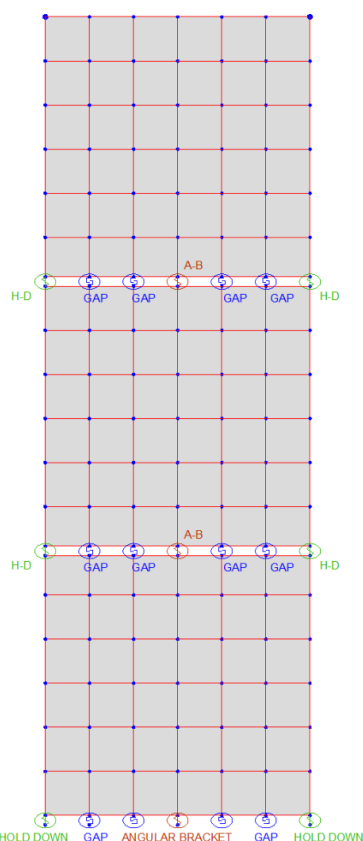


Figura 1. Rappresentazione modello FEM impiegato nelle analisi dinamiche

### 3.2 Risultati delle analisi dinamiche incremental

Analisi dinamiche incremental con input sismico a frequenza variabile sono state eseguite sul caso studio descritto in precedenza. In input sono state assegnate delle funzioni di tipo sinusoidale variando in un primo momento la frequenza ed in un secondo momento l'ampiezza. Misurando lo spostamento in sommità alla parete si estrapolano dall'output del modello FEM delle curve ampiezza-periodo. In particolare, ad ogni

ampiezza è stata associata una curva, rappresentata con colorazione differente in Figura 2.

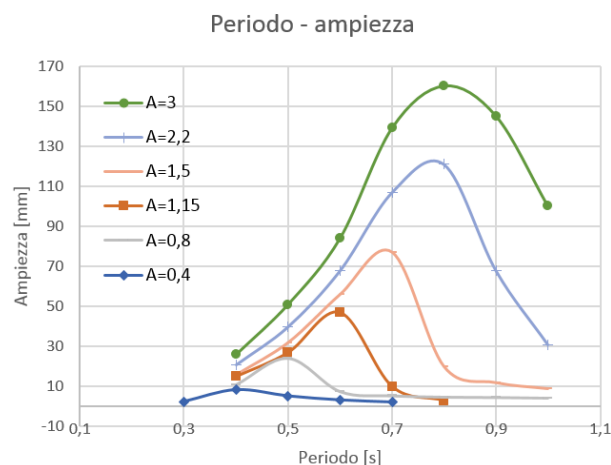


Figura 2. Risultati delle analisi dinamiche incremental sul caso di studio di lama di controventamento di tre piani.

I risultati ottenuti evidenziano che il periodo varia in funzione dello spostamento. In particolare, per spostamenti elevati, si riscontrano periodi alti, in quanto gran parte dei connettori resistenti a trazione risultano attivi. Al contrario, per spostamenti bassi, i carichi verticali impediscono la rotazione della parete con conseguente disattivazione degli hold down: si riscontra così una maggior rigidezza della struttura, con periodi di vibrare minori.

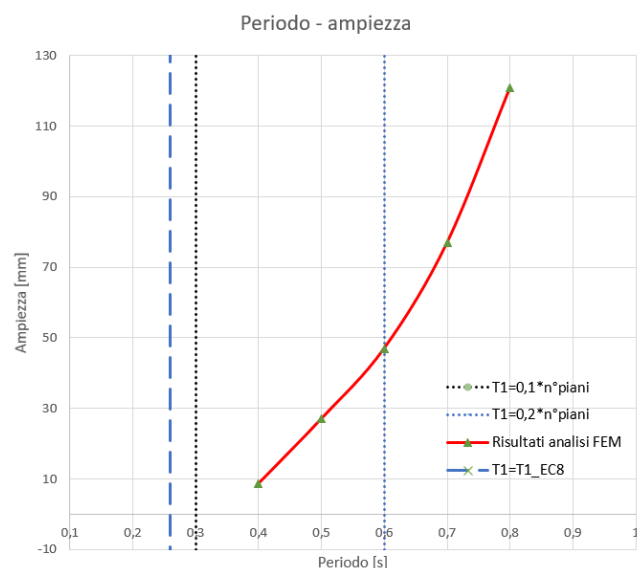


Figura 3. Correlazione Ampiezza dello spostamento in sommità – Periodo principale di vibrazione (T1).

La curva di colore rosso di Figura 3 è ottenuta isolando i punti di picco di ognuna delle curve riportate in Figura 2 e correla in maniera univoca

lo spostamento misurato in sommità alla parete, al periodo proprio di vibrare. Si riporta inoltre un confronto con il periodo calcolato con la formulazione semplificata proposta dall'Eurocodice 8 e con le formulazioni semplificate che stimano il periodo proprio di vibrare delle strutture in legno nel range  $0,1n < T1 < 0,2n$  con  $n$  numero di piani dell'edificio.

Come si può notare dalla Figura 3, la variazione del periodo  $T1$  è influenzata (range da 0,4 a 0,8 s) dall'ampiezza della risposta della struttura correlata a sua volta all'intensità dell'input sismico. Le variabili che entrano in gioco nella correlazione tra ampiezza e periodo proprio della struttura sono molteplici. Due fra le più importanti sono sicuramente la rigidità dei connettori resistenti a trazione e il carico verticale stabilizzante agente sulle pareti. Per capire meglio tale influenza sono state eseguite ulteriori analisi di sensitività raddoppiando in un primo caso la rigidità degli hold-down e nel secondo il carico verticale mantenendo inalterate le restanti variabili (e.g. geometria della parete, massa sismica etc.) rispetto al caso di riferimento appena descritto.

In Figura 4 è riportato un confronto tra il caso studio definito di riferimento, e gli altri casi studio considerati nell'analisi di sensitività nei quali sono state variate rispettivamente rigidità dei connettori a trazione e carico verticale.

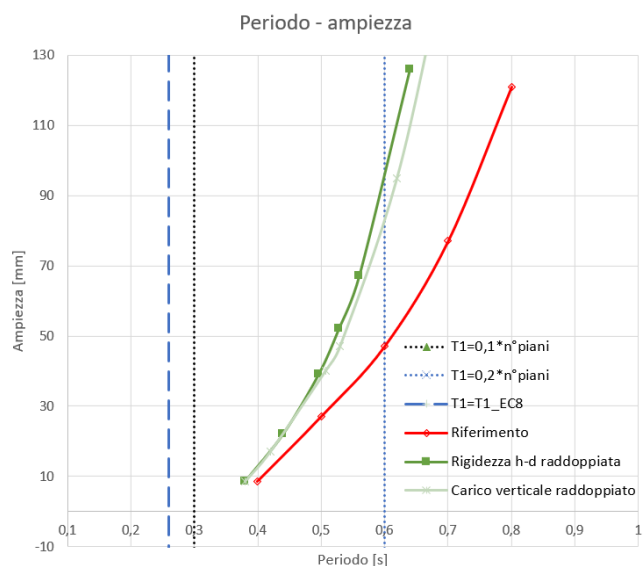


Figura 4. Confronto tra le analisi di sensitività.

Si osserva come il range di variazione del periodo diminuisce sia se si aumentano le rigidità degli hold-down, sia se si incrementa il carico verticale stabilizzante. Si nota come il periodo calcolato con la formula semplificata dell'Eurocodice 8, sottostimi il periodo reale  $T1$

della struttura, mentre ci si avvicina maggiormente con la formula  $T1=0.2n$ .

#### 4 CAMPAGNA SPERIMENTALE SU TELAIO CONTROVENTATO CON SETTI IN X-LAM

Al fine di validare e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti dalle analisi dinamiche incrementali, è stata progettata ed eseguita una campagna sperimentale volta all'identificazione dinamica di un prototipo di edificio ad un piano in X-Lam. La sperimentazione è stata condotta presso *CIRI Edilizia e Costruzioni* dell'Università degli studi di Bologna. Sono stati eseguite prove di rilascio e con vibrodina volte alla caratterizzazione dinamica di un edificio.

Entrambe le tipologie di test sono state eseguite su un prototipo di edificio monopiano controventato nella direzione minori con diagonali in legno e nella direzione lunga con pareti in X-Lam (Figura 5).



Figura 5. Prototipo edificio monopiano

##### 4.1 Setup prove di rilascio

Il setup utilizzato per tale tipologia di prova è stato progettato al fine di imporre uno spostamento iniziale predefinito al prototipo. Una volta raggiunta la configurazione deformata la struttura viene rilasciata istantaneamente lasciandola quindi libera di oscillare (Figura 6).

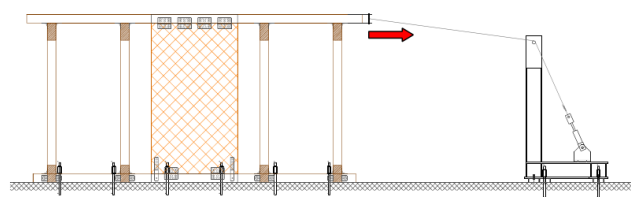


Figura 6. Setup test di rilascio

Gli elementi principali del setup di prova sono:

- telaio di contrasto metallico;
- martinetto idraulico con capacità di carico 10 kN monodirezionale;
- elemento fusibile che individua il punto in cui effettuare il taglio realizzato con bullone sacrificale M8 cl. 8.8;
- sistema di masse applicate al solaio che funge da carico verticale stabilizzante di 40 kN come riportato in Figura 7.

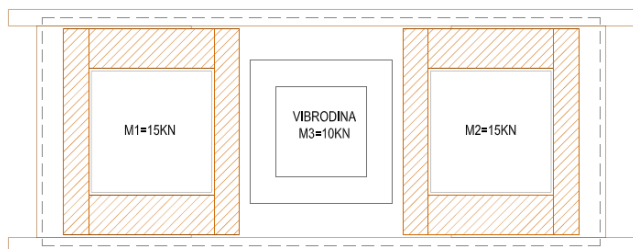


Figura 7. Disposizione delle masse sul solaio

Gli spostamenti e le accelerazioni a livello del solaio sono stati misurati rispettivamente per mezzo di due trasduttori induttivi di tipo LVDT e di sei accelerometri come mostrato in Figura 8.

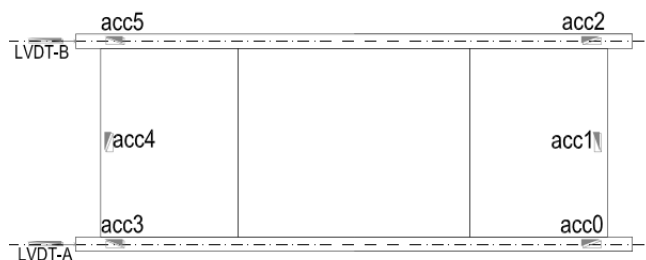


Figura 8. Disposizione trasduttori e accelerometri

#### 4.2 Setup prove con vibrodina

Le prove consistono nel sollecitare la struttura con forzanti sinusoidali ad ampiezza costante a frequenza variabile al fine di determinare la condizione di risonanza. Il setup di prova utilizzato per testare il prototipo di edificio monopiano è composta da delle masse applicate sul solaio per un peso totale di 30 kN e dalla vibrodina del peso di circa 10 kN. Quest'ultima è ancorata alla struttura con quattro barre filettate M24 ed è orientata al fine di fornire una forzante dinamica nella direzione controventata con pareti in X-Lam, come mostrato in Figura 9.

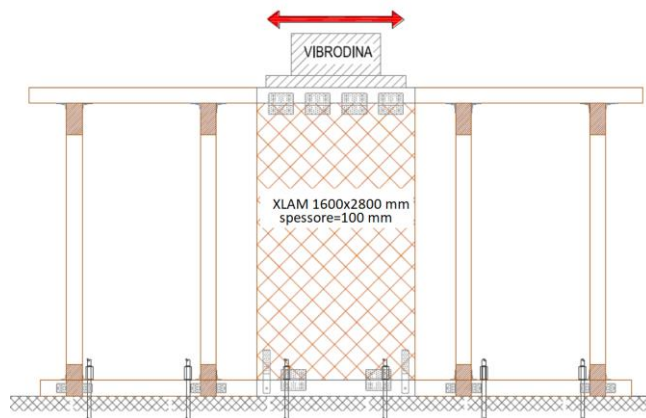


Figura 9. Setup test con vibrodina

In Figura 10 si riportano i connettori impiegati per connettere la parete in X-LAM alla trave superiore e alla trave inferiore con le relative spaziature. I connettori resistenti a trazione sono del tipo WHTPLATE 440, quelli resistenti a taglio TCNPLATE 240.

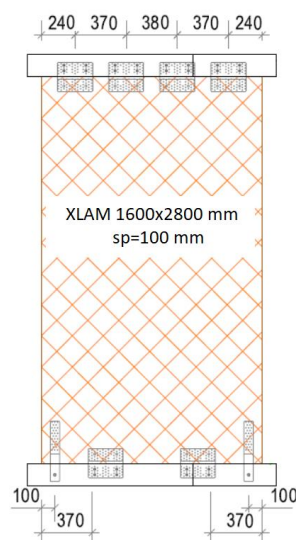


Figura 10. Connettori previsti

Per la misura delle accelerazione del prototipo sono stati utilizzati sei accelerometri. In particolare sono state misurate le accelerazioni trasversali (acc1 e acc4) e longitudinali (acc0, acc2, acc3 e acc5) della struttura in corrispondenza del solaio come mostrato in Figura 11.

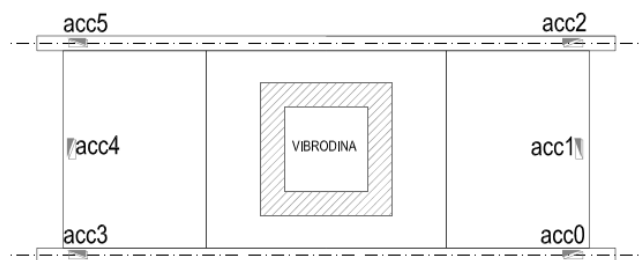


Figura 11. Disposizione accelerometri

### 4.3 Risultati sperimentali

Particolarmente interessanti ai fini del presente lavoro sono risultati i test di rilascio in quanto hanno permesso di cogliere la variazione di rigidezza del prototipo in funzione dello spostamento imposto in sommità. Questa variazione di rigidezza è dovuta all'attivazione o meno dei connettori resistenti a trazione. Il calcolo della rigidezza è ottenuto dal rapporto tra spostamento imposto e il relativo carico applicato dal martinetto. Sono stati imposti in sommità al prototipo spostamenti orizzontali crescenti da 1 mm a 8 mm con passo 0.5 mm. In Tabella 2 sono riportati i risultati in termini di spostamento applicato (S), forza registrata (F) e rigidezza calcolata (K).

Tabella 2. Risultati test

N. Prova	S	F	K
	[mm]	[kN]	[kN/mm]
0 XLAM1_01	1.0	5.94	5.94
5 XLAM1_01	1.5	7.42	4.95
0 XLAM1_02	2	8.61	4.31
5 XLAM1_02	2.5	9.66	3.86
0 XLAM1_03	3	10.40	3.47
5 XLAM1_03	3.5	11.14	3.18
0 XLAM1_04	4	12.18	3.05
5 XLAM1_04	4.5	13.22	2.94
0 XLAM1_05	5	14.11	2.82
5 XLAM1_05	5.5	14.85	2.70
0 XLAM1_06	6	16.34	2.72
5 XLAM1_06	6.5	17.82	2.74
0 XLAM1_07	7	17.82	2.55
5 XLAM1_07	7.5	21.53	2.87
0 XLAM1_08	8	22.28	2.79

Ulteriori risultati si sono ottenuti elaborando i segnali ottenuti dagli accelerometri. In particolare sono state calcolate le frequenze del sistema per mezzo delle trasformate di Fourier (FFT) ad ogni livello di spostamento imposto. Nel dettaglio sono state definite due zone, la prima definita “di rilascio” dove si è valutata la trasformata andando

a considerare unicamente la finestra temporale vicina al rilascio, poi si è definita un'ulteriore frazione temporale in cui si è applicata la FFT della zona “stabile”. In Figura 12 si riportano le trasformate per le diverse zone, ad ogni livello di spostamento imposto.

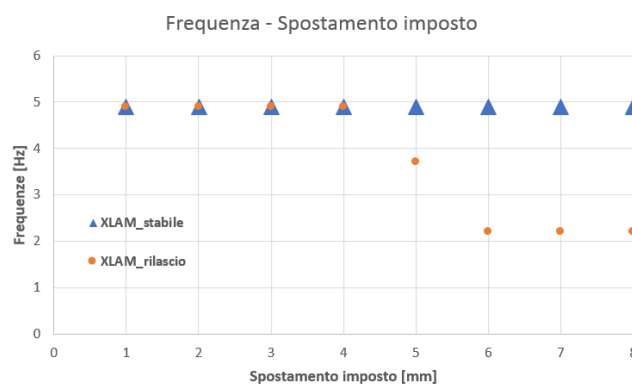


Figura 12. Valori delle frequenze ottenute con i test sperimentali per i differenti meccanismi di funzionamento delle pareti X-LAM

Si nota una diminuzione di frequenza a 5 mm di spostamento che mette in evidenza una variazione di rigidezza dovuta al fenomeno di rocking. Questa variazione di rigidezza che si ha solo nella zona di rilascio ovvero quando si hanno gli spostamenti maggiori. Per spostamenti bassi invece i carichi verticali agenti sono sufficienti a stabilizzare la parete, non attivando la rotazione della parete in X-Lam neanche nella fase definita di rilascio.

### 4.4 Modello FEM prototipo

Con lo scopo di confrontare le rigidezze desunte dai test e quelle ricavate da modellazione numerica agli elementi finiti si è implementato il modello riportato in Figura 13. In particolare sono state eseguite analisi elastiche non lineari applicando forze orizzontali crescenti a livello della trave superiore per replicare la forza del martinetto. Per ogni livello di forza applicata si ricava dall'output del modello lo spostamento associato così da calcolare la rigidezza del sistema. I connettori impiegati nei test (WHTPLATE 440, TCNPLATE 240) sono stati implementati con molle lineari, mentre per simulare il contatto tra pannelli X-Lam e travi in legno lamellare superiori e inferiori si utilizzano molle reagenti alla sola compressione di tipo GAP. E' stata inoltre assegnata una rigidezza al telaio pari a 0.89 kN/mm, desunta quest'ultima da test sperimentali. Sono state applicate le masse pari a 40 kN (Figura 7) a livello del solaio. Quest'ultime sono fondamentali in quanto responsabili della non

attivazione dei connettori resistenti a trazione per piccoli spostamenti. La Figura 13 riporta il dettaglio del modello FEM utilizzato.

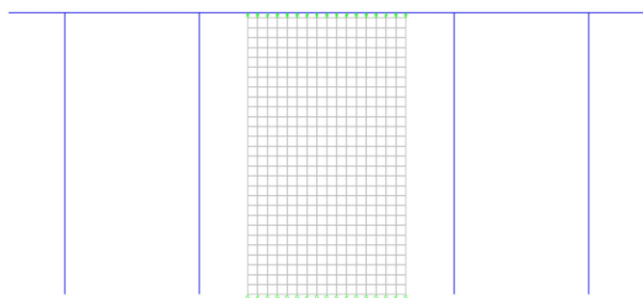


Figura 13. Modello FEM per simulare prototipo

Le rigidzze dei connettori impiegati sono riassunte in Tabella 3.

Tabella 3. Rigidzze connettori metallici.

Connettore	K [N/mm]
WHT_P44	6115
TCN_P240	6220
GAP	Infinita (solo compressione)

La disposizione delle connessioni resistenti a taglio e trazione è la medesima prevista in fase sperimentale e riportata in Figura 10.

Per i diversi livelli di forza applicati in sommità si è estrapolato dall'output del modello lo spostamento associato. Dal rapporto tra forza applicata e spostamento è possibile calcolare la rigidzza del sistema. In Figura 14 si illustra il confronto tra rigidzza desunta dai test sperimentali e quella ottenuta da modello FEM.

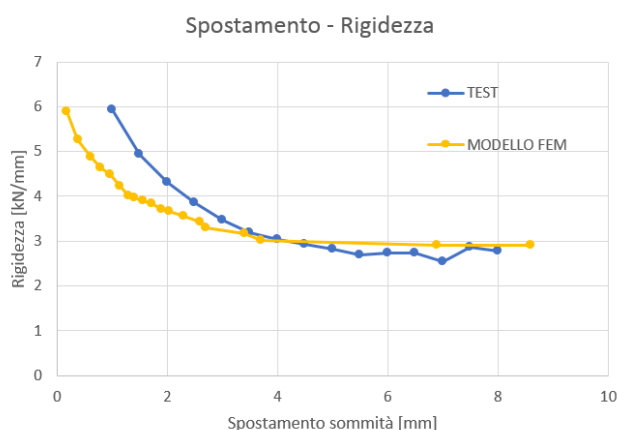


Figura 14. Confronto tra rigidzza Test-modello FEM

Per spostamenti imposti in sommità inferiori a 3 mm si riscontra uno scostamento tra le rigidzze valutate dalle prove sperimentali e dal modello FEM. Questa differenza è probabilmente imputabile a fenomeni attritivi o contributi resistenti secondari non considerati nel modello.

Per spostamenti superiori ai 3 mm le due curve si sovrappongono. E' importante sottolineare come anche dal modello FEM si noti una sostanziale diminuzione di rigidzza della struttura dovuta all'attivarsi del meccanismo di rocking e quindi all'attivazione dei connettori resistenti a trazione.

Il modello numerico impiegato per l'analisi del caso studio si può quindi ritenere validato sulla base del test sperimentale di riferimento.

## 5 CONCLUSIONI

I risultati riportati nel presente lavoro dimostrano come vi sia una correlazione tra spostamento e rigidzza delle strutture controventate con pannelli in X-Lam. In particolare all'aumentare dello spostamento, i carichi verticali non sono più sufficienti a stabilizzare le pareti e ne consegue l'attivazione degli hold down. Tale attivazione comporta una diminuzione della rigidzza della struttura e una variazione del periodo proprio di vibrare  $T_1$ . Al contrario, per carichi verticali elevati e per bassi spostamenti è necessario trascurare il contributo di deformazione legato ai connettori resistenti a trazione. Questa valutazione, seppur di fondamentale importanza ai fini della caratterizzazione del comportamento dinamico delle strutture, è spesso trascurata, soprattutto nei casi in cui si implementano analisi lineari con spettro di riposta.

Nell'abito di questo lavoro è stata proposta una procedura per la valutazione del periodo fondamentale degli edifici X-Lam in funzione dello spostamento di interpiano e dell'entità del carico verticale. La procedura è basata sull'impiego di modelli FEM non lineari dell'edificio X-Lam con cui eseguire analisi dinamiche elastiche-non lineari di tipo incrementale con input sismico a frequenza variabile.

A validazione del metodo di analisi e di modellazione proposti sono stati elaborati ed analizzati i risultati ottenuti nella campagna sperimentale di identificazione dinamica delle strutture controventate con pareti in X-Lam svolta dal CIRI Edilizia e Costruzioni dell'Università degli studi di Bologna.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'azienda LegnoSinergia per il supporto dato alla ricerca nella fasi di allestimento



del prototipo di edificio ad un piano. Si ringraziano per la collaborazione allo svolgimento delle prove sperimentali di identificazione dinamica l'ing. Alessandro Bellini e l'ing. Andrea Incerti del laboratorio prove meccaniche CIRI-EC università di Bologna.

## REFERENCES

- Izzi M., Casagrande D., Bezzi S., Pasca D., Follesa M., Tomasi R. (2018) " Seismic behaviour of Cross-Laminated Timber structures: a state-of-the-art review" in *Engineering Structures*, Volume 170, 1 September 2018, Pages 42-52, Elsevier, 2018
- Ceccotti, A., 2008. New technologies for construction of medium-rise buildings in seismic regions: the X-lam case. *Structural Engineering International*, 18(2), pp. 156–165.
- Ceccotti, A., Sandhaas, C., Okabe, M., Yasumura, M., Minowa, C. & Kawai, N., 2013. SOFIE project - 3D shaking table test on a seven-storey full-scale cross-laminated timber building. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **42**(13), pp. 2003–2021.
- Gavric, I., Fragiaco, M. & Ceccotti, A., 2015. Cyclic behavior of X-Lam wall systems: experimental tests and analytical prediction models. *Journal of Structural Engineering*, **141**(11), 04015034-1–14.
- Hristovski, V., Dujic, B., Stojmanovska, M. & Mircenvska, V., 2013. Full-scale shaking-table tests of X-lam panel system and numerical verification: specimen 1. *Journal of Structural Engineering*, **139**(11), pp. 2010–2018.
- Popovski, M. & Gavric, I., 2013. Performance of a 2-Story X-Lam house subjected to lateral loads. *Journal of Structural Engineering*, **142**(4), E4015006-1-12.
- Pozza, L. & Scotta, R., 2014. Influence of wall assembly on q-factor of XLam buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Journal Structures and Buildings*,
- Tomasi, R., & Smith, I., 2015. Experimental characterization of monotonic and cyclic loading responses of X-Lam panel-to-foundation and angle bracket connections, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **27**(6), 04014189.
- Casagrande, D., Polastri, A., Sartori, S., Loss, C., Chiodega, M., 2016. Experimental campaign for the mechanical characterization of connection systems in the seismic design of timber buildings. *XXIII World Conference. Timber Engineering, WCTE 2016*, Vienna, Austria
- Casagrande D., S. Rossi, T. Sartori, R. Tomasi (2016), "Proposal of an analytical procedure and a simplified numerical model for elastic response of single-storey timber shear-walls" in *Construction and Building Materials Engineering*, Volume: 102, Pages: 1101-1112, Elsevier, 2016
- Pozza, L., Ferracuti, B., Massari, M., Savoia, M., 2018. Axial – shear interaction on CLT hold-down connections – experimental investigation. *Engineering Structures Vol. 160*, pp 95-110.
- Pozza, L., Savoia, M., Saetta, A., Talledo, D., (2018). Angle bracket connections for CLT structures: Experimental characterization and numerical modelling. *Construction and Building Materials* **91** (2018) 95–113.
- Rinaldin, G., Amadio, C. & Fragiaco, M., 2013. A component approach for the hysteretic behaviour of connections in cross-laminated wooden structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **42**(13), pp. 2023–2042.
- Dujic, B., Strus, K., Zarnic, R. & Ceccotti, A., 2010. Prediction of dynamic response of a 7-storey massive X-lam wooden building tested on a shaking table. *Proceedings of World Conference on Timber Engineering (WCTE)*, Riva del Garda, Italy.
- Pei, S., van de Lindt, J.W. & Popovski, M. 2013. Approximate R-factor for cross-laminated timber walls in multistorey buildings. *Journal of Architectural Engineering*, **19**(4), pp. 245–255.
- Pozza, L., Savoia, M., Franco, L., Saetta, A., Talledo, D., 2017. Effect of different modelling approaches on the prediction of the seismic response of multi-storey X-Lam buildings. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. Vol. 5, No. 6 (2017) 953-95.
- Polastri, A., Pozza, L., 2016. Proposal for a standardized design and modeling procedure of tall X-Lam buildings. *International Journal for Quality Research* **10**(3) 607–624 ISSN 1800-6450
- Comité Européen de Normalisation (CEN) (2013). *Eurocode 8 - design of structures for earthquake resistance, part 1: General rules, seismic actions and rules*, CEN Brussels, Belgium
- Lucisano, G., Stefanovic, M., & Fragassa, C. (2016). Advanced Design Solutions for High-Precision Woodworking Machines. *International Journal of Quality Research*; **10**(1), 143-158.
- Pozza, L., Scotta, R., Trutalli, D., Polastri, A., & Smith, I. (2015). Experimentally based q-factor estimation of X-Lam walls. *Proceedings of the institution of civil engineers journal structures and buildings*.