

Figura 4.12 - Curva carico-spostamento-resistenza a rifollamento per la prova 4//.

In figura [Figura 4.13] si riporta un confronto tra le curve carico-spostamento, relativamente alla prima fase di carico.



Figura 4.13 - Confronto tra le curve carico-spostamento-resistenza a rifollamento delle prove della campagna di prova A).

In tabella 4.2 si riporta la sintesi dei risultati sperimentali delle cinque prove eseguite. Dai risultati sperimentali si nota che la resistenza a rifollamento per un chiodo di acciaio temprato di diametro 4 mm, infisso in una tavola d'assito di legno d'abete dello spessore di 22 mm e sollecitato parallelamente alla fibratura del legno è dell'ordine dei 50 N/mm².

Prova	Prova 0//	Prova 1//	Prova 2//	Prova 3//	Prova 4//	Media
F _{el} [kN]	2,60	2,50	2,20	2,50	2,60	2,48
F_{max} assoluta [kN]	4,40	4,50	4,50	4,40	4,60	4,48
F_{max} a 4 mm [kN]	4,30	4,45	4,47	4,35	4,50	4,41
$f_{h,0}$ [N/mm ²]	49,0	50,5	51,0	49,5	51,0	50,0

Tabella 4.2 - Confronto tra le prove per la determinazione della resistenza a rifollamento per chiodi sollecitati parallelamente alla fibratura del legno.



Figura 4.14 - I cinque campioni a termine della prova per la determinazione della resistenza a rifollamento per chiodi sollecitati parallelamente alla fibratura del legno.

4.3.5. Risultati delle prove B): rifollamento per chiodi sollecitati ortogonalmente alla fibratura del legno (f_{h.90})

La seconda campagna di prove è stata condotta su cinque provini sollecitati ortogonalmente alla fibratura del legno [Figura 4.15].



Figura 4.15 - Prova per la determinazione della resistenza caratteristica al rifollameto per un chiodo sollecitato ortogonalmente alla fibratura del legno.

Si riportano innanzitutto i risultati ottenuti nel caso di provino con foro di forma trapezoidale per l'alloggio della lama di rinforzo (prova 0): i risultati sperimentali [Figura 4.16] mostrano per il provino un carico elastico di circa 1,5 kN.

Si è scelto di considerare come F_{max} il carico in corrispondenza del quale si ha un rifollamento pari a 4 mm, in questo caso pari a 3,3 kN.

La resistenza a rifollamento è stata calcolata come segue:

$$f_{h,90} = \frac{F_{\max}}{s \ d} = \frac{3300 \ N}{22 \cdot 4 \ mm} = 37,5 \frac{N}{mm^2}$$



Figura 4.16 - *Curva carico-spostamento-resitenza a rifollamento per la prova* 0 .

Come per il caso di chiodo sollecitato parallelamente alla fibratura del legno, i test in cui il provino presenta un'apertura per alloggiare la piastra metallica di tipo rettangolare e quindi di più facile realizzazione, hanno dato esiti del tutto simili a quello appena analizzato. Da tale considerazione, la scelta di eseguire le successive quattro prove con questa soluzione, anche per la campagna di prove B).

Prendiamo ad esempio la prova 4 , espressiva dell'andamento medio di tutte le prove: i risultati sperimentali [Figura 4.17] mostrano per il provino un carico elastico di circa 1,5 kN.

Si è scelto di considerare come F_{max} il carico in corrispondenza del quale si ha un rifollamento di 4 mm, in questo caso pari a 3,1 kN.

La resistenza a rifollamento è stata calcolata come segue:

$$f_{h,90} = \frac{F_{\text{max}}}{s \, d} = \frac{3100 \, N}{22 \cdot 4 \, mm} = 35,0 \frac{N}{mm^2}$$



Figura 4.17 - *Curva carico-spostamento-resitenza a rifollamento per la prova* 4 .

In figura [Figura 4.18] si riporta una sintesi del lavoro svolto relativamente alla campagna di prove B). Vengono confrontate le curve carico-spostamento, relativamente alla prima fase di carico.



Figura 4.18 - Confronto tra le curve carico-spostamento-resistenza a rifollamento delle prove della campagna di prova B).

In tabella [Tabella 4.3] si riportano i valori ottenuti per le cinque prove della campagna B). Dai risultati sperimentali si nota che la resistenza a rifollamento per un chiodo di acciaio temprato di diametro 4 mm, infisso in una tavola d'assito di legno d'abete dello spessore di 22 mm e sollecitato ortogonalmente alla fibratura del legno è dell'ordine dei 37 N/mm².

Prova	Prova 0⊥	Prova 1⊥	Prova 2⊥	Prova 3⊥	Prova 4⊥	Media
F _{el} [kN]	1,40	1,40	1,50	1,50	1,50	1,46
F _{max} assoluta [kN]	3,40	3,50	3,40	3,20	3,30	3,36
F_{max} a 4 mm [kN]	3,20	3,40	3,35	3,10	3,30	3,27
$f_{h,90}$ [N/mm ²]	36,0	38,5	38,0	35,0	37,5	37,0

Tabella 4.3 - Confronto tra le prove per la determinazione della resistenza a rifollamento per chiodi sollecitati ortogonalmente alla fibratura del legno.



Figura 4.19 - I cinque campioni a termine della prova per la determinazione della resistenza a rifollamento per chiodi sollecitati ortogonalmente alla fibratura del legno.

4.3.6. Risultati delle prove C): rifollamento per chiodi sollecitati con un'inclinazione di 45° rispetto alla fibratura del legno ($f_{h,45}$)

La terza campagna di prove è stata condotta su cinque provini sollecitati con un'inclinazione di 45° rispetto alla fibratura del legno [Figura 4.20].



Figura 4.20 - Prova per la determinazione della resistenza caratteristica al rifollameto per un chiodo sollecitato con un'inclinazione di 45° rispetto alla fibratura del legno.

Si riportano innanzitutto i risultati ottenuti nel caso di provino con foro di forma trapezoidale per l'alloggio della lama di rinforzo (prova $0 \angle$): i risultati sperimentali [Figura 4.21] mostrano per il provino un carico elastico di circa 2,2 kN.

Considerando la F_{max} (3,8 kN) come il carico in corrispondenza del quale si ha un rifollamento pari a 4 mm, si ha che:

$$f_{h,45} = \frac{F_{\text{max}}}{s \ d} = \frac{3800 \ N}{22 \cdot 4 \ mm} = 43.0 \frac{N}{mm^2}$$



Figura 4.21 - Curva carico-spostamento-resitenza a rifollamento per la prova 0∠.

I test in cui il provino presenta un'apertura per alloggiare la piastra metallica di tipo rettangolare e quindi di più facile realizzazione, hanno dato esiti del tutto simili a quello appena analizzato. Da tale considerazione, la scelta di eseguire le successive quattro prove con questa soluzione, operativamente più pratica.

Prendiamo ad esempio la prova 4∠, espressiva dell'andamento medio di tutte le prove: i risultati sperimentali [Figura 4.22] mostrano per il provino un carico elastico di circa 1,9 kN.

Considerando la F_{max} (3,6 kN) come il carico in corrispondenza del quale di ha un rifollamento pari a 4 mm, si ha che:

$$f_{h,45} = \frac{F_{\text{max}}}{s \ d} = \frac{3600 \ N}{22 \cdot 4 \ mm} = 41.0 \frac{N}{mm^2}$$



Figura 4.22 - *Curva carico-spostamento-resitenza a rifollamento per la prova* 4∠..

In figura [Figura 4.23] si riportano le curve carico-spostamento, relativamente alla prima fase di carico.



Figura 4.23 - Confronto tra le curve carico-spostamento-resistenza a rifollamento delle prove della campagna di prova C).

In tabella [Tabella 4.4] vengono riportati i valori di resistenza caratteristica ottenuti da ognuna delle cinque prove. Dai risultati sperimentali si nota che la resistenza a rifollamento per un chiodo di acciaio temprato di diametro 4 mm, infisso in una tavola d'assito di legno d'abete dello spessore di 22 mm e sollecitato con un'inclinazione di 45° rispetto alla fibratura del legno è dell'ordine dei 42 N/mm².

Prova	Prova 0∠	Prova 1∠	Prova 2∠	Prova 3∠	Prova 4∠	Media
F _{el} [kN]	1,90	2,30	2,10	1,90	2,20	2,08
F_{max} assoluta [kN]	3,70	4,00	3,80	3,75	3,85	3,82
F_{max} a 4 mm [kN]	3,65	3,90	3,70	3,60	3,80	3,73
$f_{h,45}$ [N/mm ²]	41,5	44,0	42,00	41,0	43,0	42,3

Tabella 4.4 - Confronto tra le prove per la determinazione della resistenza a rifollamento per chiodi sollecitati con una inclinazione di 45° rispetto alla fibratura del legno.



Figura 4.24 - I cinque campioni a termine della prova per la determinazione della resistenza a rifollamento per chiodi sollecitati con un'inclinazione di 45° rispetto alla fibratura del legno.

4.3.7. Confronto tra i risultati delle prove di rifollamento

I risultati ottenuti nelle campagne di prova per la determinazione della resistenza a rifollamento mostrano che il caso di chiodo sollecitato ortogonalmente alle fibre presenta una resistenza pari a circa il 75% di quella offerta dal caso di chiodo sollecitato parallelamente alla fibratura del legno. Circa l'85% è invece la resistenza in caso di chiodo sollecitato con un'inclinazione di 45° rispetto alla fibratura del legno.

Dai risultati sperimentali si evince quindi che la resistenza a rifollamento risulta influenzata in maniera piuttosto limitata dall'inclinazione della forza rispetto alle fibre del legno e questo permette di non considerare diversamente la giacitura delle tavole nel doppio assito.

Può essere interessante andare a confrontare i risultati ottenuti con le indicazioni presenti in normativa: secondo il CNR DT 206/2007, "per chiodi aventi diametri fino a 8 mm, in assenza di risultati più accurati, si possono adottare le seguenti resistenze caratteristiche a rifollamento per il legno massiccio, lamellare e LVL:

- senza preforatura: $f_{h,k} = 0,082 \ \rho_k \ d^{(-0,3)}$ - con preforatura $f_{h,k} = 0,082 \ (1-0,01 \ d) \ \rho_k$

dove:

 ρ_k è la massa volumica caratteristica del legno, in kg/m³

d è il diametro del chiodo, in mm¹⁴

Considerando le condizioni della prova effettuata in laboratorio, ovvero: ρ_k = 420 kg/m³, *d*=4 mm e il caso con preforatura, in quanto la parte superiore del foro del chiodo non è confinato per la presenza della tasca d'alloggio della lama di rinforzo, si ottiene che $f_{h,k}$ =33,1 N/mm²; si tratta di un valore minore rispetto a quanto ottenuto dalla campagna di prova A).

Per quanto riguarda i casi di chiodo sollecitato ortogonalmente alla fibratura del legno (B) e con un'inclinazione di 45° (C), in normativa non sono presenti formule in grado di determinarne i valori. Per avere un'idea degli ordini di grandezza può essere comunque interessante utilizzare le indicazioni previste per i bulloni e gli spinotti, in caso di connettori sollecitati secondo un angolo α rispetto alla fibratura del legno: "*per bulloni e spinotti aventi diametro* \leq 30 *mm*, *si adottano i seguenti*

¹⁴ CNR DT 206/2007, "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e il controllo delle strutture in legno (§7 – Collegamenti)".

valori caratteristici della resistenza a rifollamento del legno massiccio, lamellare e LVL, relativi ad un angolo α dello sforzo rispetto alla direzione della fibratura:

$$f_{h,a,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \operatorname{sen}^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

dove:

 $f_{h,0,k}$ è la resistenza caratteristica al rifollamento per $\alpha=0^{\circ}$ [N/mm²];

*k*₉₀ *è pari a 1,35+0,015d per legno di conifere massiccio e lamellare;*

*α è l'angolo di inclinazione dello sforzo rispetto alle fibre del legno."*¹⁵

Applicando la formula al valore medio sperimentale $f_{h,0}$ =50,2 N/mm² si ottiene per α =90° e α =45° rispettivamente 35,6 N/mm² e 41,7 N/mm², valori in buon accordo con quanto ottenuto sperimentalmente nelle campagne di prove B) e C).

Resistenza al rifollamento	Valore medio sperimentale dedotto da prove condotte secondo la UNI EN 383	Valore caratteristico secondo CNR-DT 206/2007 (assimilando il chiodo ad uno spinotto)
Campagna di prove A): f _{h,0}	50,2 N/mm ²	33,1 N/mm ²
Campagna di prove B): f _{h,90}	37,0 N/mm ²	(23,4 N/mm²)
Campagna di prove C): f _{h,45}	42,3 N/mm ²	(27,4 N/mm ²)

Tabella 4.5 –Confronto tra i valori di resistenza caratteristica al rifollamento determinati secondo la UNI EN 383 e le disposzioni del CNR-DT 206/2007.

Dalla tabella [Tabella 4.5] si evince una differenza tra i valori determinati sperimentalmente e la resistenza fornita dalla normativa. Il motivo di tale discrepanza è da ricondursi a diversi fattori:

- la scelta di considerare *F_{max}* come il carico in corrispondenza del quale si ha un rifollamento di 4 mm (valore elevato rispetto agli standard);
- per i risultati sperimentali è stato considerato il valore medio mentre nella normativa si fa riferimento al valore caratteristico, che differisce dal valore medio in funzione della dispersione dei valori;
- la normativa deve per sua natura fornire un valore cautelativo.

¹⁵ CNR DT 206/2007, "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e il controllo delle strutture in legno (§7 – Collegamenti)".

4.4. Prove di caratterizzazione del piatto metallico

Per determinare le caratteristiche meccaniche dell'acciaio utilizzato per il corrente perimetrale sono state eseguite prove di trazione secondo la norma UNI EN ISO 6892-1¹⁶.

Dal piatto 100x3 mm sono stati ricavati 3 campioni di larghezza 30 mm e lunghezza 300 mm mediante tranciatura a freddo. Prima della prova sui campioni sono stati realizzati dei segni di riferimento equidistanti 10 mm necessari per la determinazione, dopo la rottura del campione, degli allungamenti anelastici. Per la prova è stata utilizzata la macchina MetroCom da 100 kN [Figura 4.25].



Figura 4.25 - Campione e macchina di prova utilizzata.

I risultati ottenuti sono riportati in tabella [Tabella 4.6] mentre nel grafico [Figura 4.27] sono riportate le curve fornite dalla macchina di prova relative al carico in funzione dello spostamento relativo degli apparecchi di afferraggio.

¹⁶ UNI EN ISO 6892-1/2009 "Materiali metallici - Prova di trazione".

	Dime	nsioni	Sner	vamento	Ro	ottura	A 5	Agt
Prova	а	b	F_y	fy	F_t	f_t	%	0/2
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]	70	70
1	31,8	3,05	29,84	308	42,80	441	40,6%	24,8%
2	31,6	3,05	29,20	303	41,88	435	38,9%	20,0%
3	31,9	3,05	29,77	306	42,61	438	38,5%	22,0%

Tabella 4.6 - Tabella riassuntiva delle prove di caratterizzazione eseguite sul piatto metallico.



Figura 4.26 - Piatti metallici a fine prova.



Figura 4.27 - Curve fornite dalla macchina di prova relative al carico in funzione dello spostamento tra gli apparecchi di afferraggio.

Come si può notare dalle curve [Figura 4.27] non è individuabile lo snervamento che normalmente rappresentato da un tratto plastico oscillante compreso tra la fase iniziale elastica e l'incrudimento. Si è quindi dovuto strumentare il campione con un estensimetro in modo da poter rilevare la deformazione e determinare lo snervamento proporzionale allo 0,2% di deformazione residua, come mostrato nel grafico [Figura 4.28] relativo al campione 2. In tale grafico è anche indicato il modulo elastico E=202 GPa che rappresenta la pendenza iniziale della curva.



Figura 4.28 – Determinazione del valore di snervamento per il campione 2.

I risultati consentono di classificare l'acciaio come S275. La norma di prodotto per gli acciai laminati UNI EN 10025¹⁷ prevede infatti per tale acciaio un valore di snervamento minimo di 275 N/mm², una rottura compresa tra 410 e 560 N/mm² e un allungamento A₅ minimo del 23%. Questo allungamento viene valutato su una base di misura, comprendente la sezione di rottura, pari a 5,65 volte la radice quadrata della sezione ($l_0 = 5,65\sqrt{S_0}$). Nel nostro caso essendo la base di misura circa 55 mm, si è eseguita una doppia misura dell'allungamento, su base 50 e 60 mm, e facendone poi la media.

¹⁷ UNI EN 10025-2/2005 "Prodotti laminati a caldo di acciai per impieghi strutturali - Parte 2: Condizioni tecniche di fornitura di acciai non legati per impieghi strutturali".

E' stato inoltre rilevato l'allungamento A_{gt} (UNI EN ISO 15630¹⁸) che nell'acciaio da cemento armato ha sostituito l'allungamento A_5 . Questo allungamento è misurato su una base di misura fissa (50 o 100 mm) escludendo la sezione di rottura dove si concentrano le deformazione anelastiche e aggiungendo il termine *f*_t/E. A titolo di esempio per l'acciaio ad alta duttilità B450C previsto dalle vigenti NTC 2008 il valore caratteristico indicato è del 7,5%.

Nel presente lavoro il piatto in acciaio è sollecitato dall'azione concentrata esercitata dai chiodi φ4 mm. La resistenza a rifollamento può essere valutata con la seguente formula indicata nelle NTC 2008, ponendo unitario il coefficiente di sicurezza γM

$$F_{hR} = k \alpha f_t d t = 13.1 \text{ kN}$$

dove *k*=1 e α =2,5 in quanto il foro è sufficientemente lontano dai bordi liberi, *f_t*=438 N/mm² media delle 3 prove di trazione, *d*=4 mm, *t*=3 mm.

Per capire meglio il comportamento di interazione tra il chiodo, soggetto a taglio, e il piatto metallico forato, soggetto a rifollamento, è stato realizzato il campione di figura [Figura 4.29] composto da 4 piatti di larghezza 30 mm e lunghezza 500 mm, forati alle estremità e collegati da 2 chiodi trasversali. Le estremità del campione vengono inserite nella macchina di prova. I 2 piatti centrali sono soggetti alla metà del carico applicato mentre ogni chiodo ha attivo 2 piani di taglio.

La rottura è avvenuta con un carico di 24,0 kN per il progredire del rifollamento di un piatto di estremità. Anche l'altro piatto di estremità presentava evidenti segni di rifollamento. I 2 piatti intermedi invece, sogggetti a 12,0 kN, non hanno mostrato segni di rifollamento, congruente con la resistenza teorica calcolata.

Anche i chiodi non presentavano segni di danneggiamento, confermando la resistenza a taglio pari a 13,6x2=27,2 kN.

Dalle prove sull'acciaio della cornice e dei chiodi risulta che la resistenza di questi elementi è elevata rispetto ai carichi che normalmente vengono applicati al singolo chiodo, dell'ordine di qualche kN. Il comportamento globale dell'impalcato è quindi governato fondamentalmente dal rifollamento del chiodo nel legno.

¹⁸ UNI EN ISO 15630-1/2010 "Acciaio per calcestruzzo armato e calcestruzzo armato precompresso - Metodi di prova".



Figura 4.29 - Campione e macchina di prova.



Figura 4.30 - Campione al termine della prova.



Figura 4.31 - Curva carico-spostamento relativa alla prova di rifollamento sul piatto metallico.

4.5. Prove di taglio su connessioni chiodate

Al fine di valutare gli scorrimenti relativi tra i diversi componenti dell'impalcato, in caso di sollecitazione sismica, sono state condotte delle prove locali. Tale analisi è stata anche condotta al fine di delineare la soluzione migliore tra quella che prevede la realizzazione del doppio assito inclinato con corrente metallico interposto ai tavolati lignei [Figura 4.32 a)] e quella con il corrente metallico superiore [Figura 4.32 b)].

Sono state quindi riprodotte due tipologie di campione simulanti il generico nodo perimetrale di un impalcato rinforzato con doppio tavolato e sono state sottoposte ad azioni riproducenti il sisma (ovvero azioni di taglio sul gambo del connettore).



Figura 4.32 – Schema tridimensionale della soluzione di doppio assito con corrente metallico interposto tra le tavole (a) e con corrente metallico superiore (b).

4.5.1. Caratteristiche geometriche e meccaniche dei componenti principali

I principali componenti utilizzati durante la prova sono tre: le tavole di assito, il piatto metallico e i chiodi.

Come già descritto in precedenza [4.3.1], le tavole di assito utilizzate nella fase sperimentale presentano le seguenti caratteristiche:

- materiale: legno d'abete bianco nazionale;
- dimensioni: larghezza=200 mm e spessore=22 mm;
- finitura: tavole taglio sega e non maschiate.

Si tratta in particolare di due porzioni di tavole di assito disposte in modo da simulare l'assito originale, ortogonale ai travetti, e quello di rinforzo, con un'inclinazione di 45° rispetto alla travatura sottostante.

Le caratteristiche principali del piatto metallico disposto lungo la fascia perimetrale dell'impalcato sono state determinate attraverso delle prove locali [4.4] e sono sintetizzabili come segue:

- materiale: acciaio S275;

- dimensioni: larghezza=100 mm e spessore=3 mm.

Il piatto metallico svolge sia la funzione di corrente che quella di ripartitore all'interno del diaframma di piano realizzato mediante il doppio assito. Il suo ruolo è quindi triplice: prendere l'azione flettente agente nel piano (funzione caratteristica del corrente), raccogliere gli sforzi di taglio dell'anima e trasferirli alle murature sismo-resistenti (funzione caratteristica del ripartitore) e collegare il diaframma con la muratura perimetrale (funzione svolta sia dal corrente che dal ripartitore).

Come già descritto in precedenza [4.3.1], i chiodi utilizzati nella fase sperimentale presentano le seguenti caratteristiche:

- materiale: acciaio temprato C-72, i cui valori di resistenza sono stati determinati per mezzo di prove di caratterizzazione [4.2];
- dimensioni: diametro=4 mm e lunghezza=70 mm;

I chiodi rappresentano il sistema di connessione dei tre strati appena descritti e giocano quindi un ruolo fondamentale nel comportamento del nodo simulato durante questa campagna di prove locali.

4.5.2. Descrizione del banco di prova

Al fine di studiare il comportamento a taglio delle connessioni perimetrali di un solaio rinforzato mediante doppio assito è stato progettato un banco ad hoc.

Il campione da testare rappresenta il nodo perimetrale di un solaio rinforzato mediante il doppio assito: è costituito da un tavolato simulante l'originale, un tavolato disposto a 45° rispetto al primo e un piatto metallico ortogonale al primo assito, i tre strati sono connessi da due chiodi d'acciaio. Per eseguire la prova, tale provino è stato inserito in un telaio con triplice funzione: anzitutto quella di fornire la sollecitazione (il telaio è infatti provvisto di piastra e di forcella, entrambe filettate e fornite di barra per permetterne il posizionamento all'interno delle ganasce della macchina di prova); secondo ruolo è quello di contenere il campione, che si sviluppa su tre



differenti livelli, e mediare ai meccanismi fuori piano; terza funzione è quella di permettere agli elementi non sollecitati direttamente di fornire una risposta equilibrante le forze in gioco.

Figura 4.33 - Banco di prova per lo studio del comportamento a taglio di connessioni chiodate (caso di piatto metallico superiore alle tavole d'assito, con campione sollecitato a compressione).

Come si può vedere dalla figura [Figura 4.33], l'unica componente direttamente sollecitata del campione è rappresenta dalla tavola d'assito diagonale. L'equilibrio è garantito dalle risposte fornite dal tavolato ortogonale e dal piatto metallico, sviluppate mediante il telaio di contenimento [Figura 4.34]. Esso è infatti costituito da due pannelli multistrato forati diversamente a seconda dei casi:

- il foro centrale in basso interessa il telaio, l'assito diagonale e la forcella con barra filettata per fornire il carico;
- il foro centrale in alto interessa il telaio e la piastra con barra filettata per fornire il carico;
- il foro sinistro in basso interessa il telaio e il piatto metallico e permette a quest'ultimo di fornire una risposta equilibrante la forza agente sulla tavola di assito diagonale, nel caso di compressione della stessa;

- il foro destro in alto interessa il telaio e il piatto metallico e permette a quest'ultimo di fornire una risposta equilibrante la forza agente sulla tavola di assito diagonale, nel caso di trazione della stessa;
- il foro destro in basso interessa il telaio e la tavola d'assito ortogonale e permette a quest'ultima di fornire una risposta equilibrante la forza agente sulla tavola di assito diagonale.

La scelta di fissare il piatto metallico ad entrambe le estremità deriva dall'esigenza di evitarne l'instabilità da compressione. Disponendo infatti il perno in basso a sinistra nel caso di forza "F" di compressione sul diagonale "d" [a)] e in alto a destra in caso di forza "F" di trazione sul diagonale "d" [b)], il piatto metallico risulta sollecitato solo a trazione. Durante l'interna conduzione della prova sono stati attivati alternativamente il perno in basso a sinistra e in alto a destra, a seconda della sollecitazione agente sulla tavola d'assito diagonale.



Figura 4.34 - Schema delle azioni agenti sul campione inserito nel telaio di contenimento: caso di sollecitazione di compressione (a) e di trazione (b).

Con riferimento allo schema [Figura 4.34] è possibile determinare le forze agenti sul nodo:

$$F_c = F_a = F_d \cos 45^\circ$$

dove:

 F_d azione sollecitante l'assito diagonale, impressa dalla macchina di prova;

- F_c azione sollecitante il piatto metallico, in risposta alla F_{di}
- F_a azione sollecitante l'assito originale, in risposta alla F_d .



Figura 4.35 - Campione e macchina di prova (caso di piatto metallico interposto alle tavole d'assito).

Utilizzando il banco appena descritto, sono state effettuate delle prove finalizzate alla determinazione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità delle connessioni chiodate sottoposte a sforzi di taglio.

4.5.3. Conduzione della campagna di prove

Sono stati realizzati e testati due provini, uno per tipologia: il primo riproducente il caso di doppio assito con corrente metallico superiore alle tavole e il secondo con corrente metallico interposto ad esse.

La campagna di prove è stata condotta attraverso una macchina Instron servo idraulica in controllo di carico e sono stati dedotti, mediante dei sistemi di misurazione, i corrispondenti spostamenti reciproci tra i componenti del campione. Tale scelta risulta atipica rispetto alla conduzione classica di una prova ciclica su connessioni chiodate, generalmente operata in controllo di spostamento; il motivo di tale decisione è da ricercarsi nella difficoltà operativa di controllare, in corso d'opera, gli spostamenti. Si tratta infatti di scorrimenti relativi di diversa entità componenti del campione: direzione, che interessano le tre monitorarli tutti e contemporaneamente per condurre una prova in controllo di spostamento sarebbe risultato troppo difficile e poco sicuro a livello di attendibilità dei risultati.

Sono anzitutto stati predisposti dei cicli simmetrici di carico e scarico, inizialmente sollecitando il campione a trazione e successivamente a compressione. I diversi cicli hanno interessato sia il comportamento in campo elastico che in campo elasto-plastico della connessione. Si è partiti da un ciclo con F_{max} =2 kN (in campo elastico) e poi si è aumentato gradualmente il valore della sollecitazione massima con passi di 1 kN, fino ad arrivare al quinto ciclo con F_{max} =6 kN. La prova si è conclusa con un ramo monotono che ha sollecitato il provino a trazione.

Per valutare gli spostamenti relativi tra i tre elementi del campione, sono stati disposti dei misuratori di spostamento non digitalizzati. Si è infatti optato per la disposizione di una carta millimetrata e una punta rigida, per segnare la posizione e rilevare quindi gli scorrimenti relativi. Questo è stato possibile grazie all'utilizzo di due macchine fotografiche montate su cavalletti fissi che, ad intervalli costanti di carico (una fotografia ogni 1 kN), hanno fotografato il sistema di misurazione.

La scelta di non utilizzare comparatori millesimali digitali, benché decimante più laboriosa in fase di elaborazione, è stata dettata dall'esigenza di determinare direttamente gli scorrimenti in direzione *x*, in direzione *y* e le eventuali rotazioni. Questo sarebbe risultato difficile usufruendo di un sistema digitalizzato e avrebbe comportato l'utilizzo di un gran numero di comparatori.

Confrontando le diverse posizioni della punta rigida nei vari passi di carico [Figura 4.36], è stato possibile delineare il percorso della stessa e quindi ricavare gli spostamenti reciproci tra i componenti.

86



Figura 4.36 - Esempio di elaborazione dati per la determinazione dello spostamento della punta rigida in un singolo ciclo di sollecitazione.

Innanzitutto sono stati ottenuti dei diagrammi spostamento in direzione y – spostamento in direzione x [Figura 4.37], delineanti il percorso compiuto dalla punta rigida ad ogni passo di carico e per ogni ciclo completo.



Figura 4.37 - *Esempio di diagramma dello spostamento della punta rigida al termine di un ciclo completo di sollecitazione.*

Successivamente, elaborando le componenti dello spostamento in direzione *x* e in direzione *y*, sono state prodotte delle curve carico-spostamento relative alla coppia di connettori.

Infine, per descrivere al meglio gli scorrimenti relativi tra le componenti del campione, sono state prodotte delle curve carico-spostamento parziali, in cui lo scorrimento di un elemento rispetto ad un altro è stato diagrammato in relazione alla sola componente di forza producente tale spostamento.

4.5.4. Risultati della prova condotta sul campione con piatto metallico interposto alle tavole

La prima prova a taglio è stata condotta al fine di studiare la soluzione di doppio assito con corrente metallico posizionato tra la tavola diagonale superiore e la tavola simulante l'assito originale, posta inferiormente.

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti dalla rielaborazione dei dati [Allegati – Tavola 1 e Tavola 2]: anzitutto si propone il diagramma della curva carico-spostamento relativo alla connessione chiodata, sia calcolato considerando lo scorrimento registrato tra assito diagonale e piatto metallico [Figura 4.38], sia considerando lo scorrimento tra piatto metallico e assito originale [Figura 4.39].

I risultati sperimentali relativi alla connessione chiodata e riferiti allo scorrimento tra assito diagonale e piatto metallico mostrano per il provino un carico elastico di circa 4,2 kN (pari ad un'azione di taglio sul singolo connettore di 2,1 kN), con uno scorrimento di 2,9 mm, corrispondente ad una rigidezza elastica di 0,72 kN/mm per ciascun chiodo.



Figura 4.38 - Curva carico-spostamento relativa alla connessione chiodata, considerato lo scorrimento tra assito diagonale e piatto metallico.

Superato il valore di carico elastico, si assiste un progressivo aumento notevole di spostamento in corrispondenza di limitati aumenti di carico e la curva perde di linearità. La prova ciclica ha testato una coppia di connessioni fino ad un carico massimo pari a 6,8 kN, corrispondente ad una forza di taglio massima su ciascun chiodo pari a 3,4 kN.

I risultati sperimentali relativi alla connessione chiodata e riferiti allo scorrimento tra piatto metallico e assito originale mostrano per il provino un carico elastico di circa 4,2 kN (pari ad un'azione di taglio sul singolo connettore di 2,1 kN), con uno scorrimento di 2,1 mm, corrispondente ad una rigidezza elastica di 1,00 kN/mm per ciascun chiodo.

Superato il valore di carico elastico, si assiste un progressivo aumento notevole di spostamento in corrispondenza di limitati aumenti di carico e la curva perde di linearità. La prova ciclica ha testato una coppia di connessioni fino ad un carico massimo pari a 6,8 kN, corrispondente ad una forza di taglio massima su ciascun chiodo pari a 3,4 kN.



Figura 4.39 - Curva carico-spostamento relativa alla connessione chiodata, considerato lo scorrimento tra piatto metallico e assito originale.

Dopo aver elaborato i diagrammi ciclici e aver determinato importanti informazioni a livello di resistenza, l'attenzione è stata rivolta agli scorrimenti relativi tra i vari componenti e le corrispondenti azioni sollecitanti. Come già motivato nel precedente paragrafo [Par. 4.5.5], è stata fissata una soglia massima di scorrimento relativo ($\mu_{m,n}$) pari a 1 mm al fine di assicurare un comportamento rigido dell'impalcato. Sono state quindi prodotte le curve monotone carico-spostamento [Figura 4.40 e Figura 4.41] che hanno permesso di determinare il carico massimo da affidare ad ogni chiodo al fine di limitare gli spostamenti e assicurare quindi un diaframma rigido.



Figura 4.40 - Curva carico-spostamento dell'assito diagonale rispetto al corrente (sx) e viceversa (dx).



Figura 4.41 - Curva carico-spostamento del corrente rispetto all'assito originale (sx) e viceversa (dx).

Dai risultati sperimentali si evince che, al fine di limitare lo scorrimento relativo ad 1 mm, è necessario fare lavorare la coppia di chiodi ad un carico massimo pari a 2,0 kN, ovvero 1,0 kN ogni chiodo. Dai risultati analizzati in precedenza di può notare come questo carico sia inferiore alla resistenza del chiodo e si collochi completamente in campo elastico.

Relazione studiata	Assito diagonale e piatto metallico	Piatto metallico e assito originale
φ connettori [mm]	4	4
L connettori [mm]	70	70
t assito originale [mm]	22	22
<i>t</i> assito diagonale [mm]	22	22
F_{el} [kN]	4,20	4,20
F_{max} [kN]	6,80	6,80
<i>F</i> a 1 mm [kN]	2,10	2,10
δ_{el} [mm]	2,90	2,10
<i>k_{el}</i> singolo chiodo [kN/mm]	0,72	1,00

Di seguito è riportata una tabella riassuntiva della prova a taglio della connessione chiodata in caso di doppio assito con corrente superiore:

Tabella 4.7 - Tabella riassuntiva della prova a taglio su una connessione chiodata del doppio assito con corrente interposto alle tavole.

A prova ultimata il campione è stato tolto dalla macchina e smontato. Il chiodo ha formato cerniera plastica a livello del piatto metallico centrale, come ipotizzabile.

Al fine di comprendere le posizioni assunte dal chiodo durante la prova, è stato misurato il rifollamento attraverso l'utilizzo di un calibro e ricostruito il suo comportamento.



Figura 4.42 - Campione smontato a fine prova.

Elementi interessati dal rifollamento	δ [mm]
Assito diagonale – faccia superiore (a)	1,6
Assito diagonale – faccia inferiore (b)	13,3
Piatto metallico – faccia superiore (c)	1,2
Piatto metallico – faccia inferiore (d)	0,5
Assito originale – faccia superiore (e)	6,7
Assito originale – faccia inferiore (f)	1,7

Dal rilievo effettuato sono stati ricavati i seguenti valori di rifollamento:

Tabella 4.8 - Rifollamenti registrati sui componenti del provino.

Tenendo conto dei rifollamenti registrati e degli spostamenti relativi tra i componenti del provino, è stato possibile determinare la posizione del chiodo al termine della prova.



CONFIGURAZIONE A INIZIO PROVA

Figura 4.43 - Configurazione del campione a inizio e fine prova



Figura 4.44 - Fotografie dei componenti del campione a fine prova.

4.5.5. Risultati della prova a taglio condotta sul campione con piatto metallico posizionato esternamente alle tavole di assito

La seconda prova a taglio è stata condotta al fine di studiare la soluzione di doppio assito con corrente metallico chiodato superiormente alle tavole.

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti dalla rielaborazione dei dati [Allegati – Tavola 3 e Tavola 4]: anzitutto si propone il diagramma della curva carico-spostamento del campione, calcolato considerando lo scorrimento registrato tra piatto metallico e assito [Figura 4.45], sia considerando lo scorrimento tra assito diagonale e assito originale [Figura 4.46].



Figura 4.45 - Curva carico-spostamento riferita alla connessione chiodata, considerato lo scorrimento relativo tra piatto metallico e assito diagonale.

I risultati sperimentali relativi alla connessione chiodata e riferiti allo scorrimento tra piatto metallico e assito diagonale mostrano per il provino un carico elastico di circa 4,5 kN (pari ad un'azione di taglio sul singolo connettore di 2,25 kN), con uno scorrimento di 2,2 mm, corrispondente ad una rigidezza elastica di 1,11 kN/mm per ciascun chiodo.

Superato il valore di carico elastico, si assiste un progressivo aumento di spostamento in corrispondenza di limitati aumenti di carico e si entra così in un ramo caratterizzato da mancanza di linearità.

La prova ciclica ha testato una coppia di connessioni fino ad un carico massimo pari a 8,0 kN, corrispondente ad una forza di taglio massima su ciascun chiodo pari a 4,0 kN.



Figura 4.46 - Curva carico-spostamento relativa alla connessione chiodata, considerato lo scorrimento tra assito diagonale e assito originale.

I risultati sperimentali relativi alla connessione chiodata e riferiti allo scorrimento tra assito diagonale e assito originale mostrano per il provino un carico elastico di circa 4,20 kN (pari ad un'azione di taglio sul singolo connettore di 2,10 kN), con uno scorrimento di 2,1 mm, corrispondente ad una rigidezza elastica di 1,0 kN/mm per ciascun chiodo.

Superato il valore di carico elastico, si assiste un progressivo aumento notevole di spostamento in corrispondenza di limitati aumenti di carico e la curva perde di linerarità. La prova ciclica ha testato una coppia di connessioni fino ad un carico massimo pari a 8,0 kN, corrispondente ad una forza di taglio massima su ciascun chiodo pari a 4,0 kN.

Sono stati successivamente elaborati gli scorrimenti relativi tra i vari componenti e le corrispondenti azioni sollecitanti, fino allo spostamento massimo pari a 1mm. Tale valore è stato scelto al fine di assicurare che l'implacato rinforzato lavori rigidamente.

Fissata una soglia massima di scorrimento relativo ($\mu_{m,n}$) pari a 1 mm, sono state quindi prodotte le curve monotone carico-spostamento [Figura 4.47 e Figura 4.48] che hanno permesso di determinare il carico massimo da affidare ad ogni chiodo al fine di limitare gli spostamenti e assicurare quindi un diaframma rigido.

96



Figura 4.47 - Curva carico-spostamento dell'assito diagonale rispetto al corrente (sx) e viceversa (dx).

Dai risultati sperimentali si evince che, al fine di limitare lo scorrimento relativo ad 1 mm, è necessario fare lavorare la coppia di chiodi ad un carico massimo pari a 2,0 kN, ovvero 1,0 kN ogni chiodo. Dai risultati analizzati in precedenza di può notare come questo carico sia inferiore alla resistenza del chiodo e si collochi completamente in campo elastico.



Figura 4.48 - Curva carico-spostamento dell'assito diagonale rispetto all'assito originale (sx) e viceversa (dx).

Relazione studiata	Assito diagonale e piatto metallico	Assito diagonale e assito originale
¢ connettori [mm]	4	4
L connettori [mm]	70	70
<i>t</i> assito originale [mm]	22	22
<i>t</i> assito diagonale [mm]	22	22
F _{el} [kN]	4,50	4,20
F_{max} [kN]	8,0	8,0
<i>F</i> a 1 mm [kN]	2,20	2,10
δ_{el} [mm]	2,20	1,00
k_{el} singolo chiodo [kN/mm]	1,11	1,00

Di seguito è riportata una tabella riassuntiva della prova a taglio della connessione chiodata in caso di doppio assito con corrente superiore:

Tabella 4.9 - Tabella riassuntiva della prova a taglio su una connessione chiodata del doppio assito con corrente superiore.

A prova ultimata il campione è stato tolto dalla macchina e smontato. Come si può vedere dalla fotografia sottostante [Figura 4.49] il chiodo ha formato una cerniera a livello dell'interfaccia tra assito diagonale e assito originale. Al fine di comprendere gli spostamenti del chiodo all'interno del provino, è stato misurato il rifollamento.



Figura 4.49 - Campione smontato a fine prova.

Elementi interessati dal rifollamento	δ [mm]
Piatto metallico – faccia superiore (a)	0,7
Piatto metallico – faccia inferiore (b)	0,5
Assito diagonale – faccia superiore (c)	11,6
Assito diagonale – faccia inferiore (d)	17,5
Assito originale – faccia superiore (e)	18,3
Assito originale – faccia inferiore (f)	4,8

Dal rilievo effettuato sono stati ricavati i seguenti valori di rifollamento:

CONFIGURAZIONE A INIZIO PROVA

Tabella 4.10 - Rifollamenti registrati sui componenti del provino.

Tenendo conto dei rifollamenti registrati e degli spostamenti relativi tra i componenti del provino, è stato possibile determinare la posizione del chiodo al termine della prova [Figura 4.50].





Figura 4.50 - Configurazione del campione a inizio e fine prova.



Figura 4.51 - Fotografie dei componenti del campione a fine prova.

La soluzione con piatto metallico posizionato superiormente alle tavole d'assito presenta maggiore facilità realizzativa. Considerando che i risultati forniti dai due campioni sono confrontabili sia a livello di rigidezza che di resistenza, si è scelto di effettuare un ulteriore studio sperimentale, concentrandosi solo sulla soluzione più attuabile: il doppio assito con corrente metallico superiore alle tavole.

Rispetto alla prima prova, questa è stata condotta senza l'accortezza di attivare alternativamente i pioli del piatto: entrambe le barre M18 sono rimaste inserite per l'intera prova. Il campione così realizzato è stato testato secondo gli stessi cicli previsti per le prove appena descritte e sono stati determinati i diagrammi carico-spostamento per la connessione. Non è invece stato possibile determinare la relazione tra gli scorrimenti relativi e la forza corrispondente; questo problema è dovuto all'iperstaticità del campione fissato ai pannelli di contenimento in quattro punti fissi e alla conseguente difficoltà nella determinazione delle componenti F_c e F_a .

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti dalla rielaborazione dei dati: anzitutto si propone il diagramma della curva carico-spostamento relativo alla coppia di chiodi, sia calcolato considerando lo scorrimento registrato tra piatto metallico e assito [Figura 4.52], sia considerando lo scorrimento tra assito diagonale e assito originale [Figura 4.53].



Figura 4.52 - Curva carico-spostamento relativa alla coppia di connettori, considerato lo scorrimento tra piatto metallico e assito diagonale.



Figura 4.53 - Curva carico-spostamento relativa alla coppia di connettori, considerato lo scorrimento tra assito diagonale e assito originale.

I risultati sperimentali relativi alla connessione chiodata e riferiti allo scorrimento tra piatto metallico e assito diagonale mostrano per il provino un carico elastico di circa 4,5 kN (pari ad

un'azione di taglio sul singolo connettore di 2,25 kN), con uno scorrimento di 1,8 mm, corrispondente ad una rigidezza elastica di 1,25 kN/mm per ciascun chiodo.

Superato il valore di carico elastico, si assiste un progressivo aumento notevole di spostamento in corrispondenza di limitati aumenti di carico e si entra così nel ramo plastico.

La prova ciclica ha testato una coppia di connessioni fino ad un carico massimo pari a 6,9 kN, corrispondente ad una forza di taglio massima su ciascun chiodo pari a 3,45 kN.

I risultati sperimentali relativi alla connessione chiodata e riferiti allo scorrimento tra assito diagonale e assito originale mostrano per il provino un carico elastico di circa 4,30 kN (pari ad un'azione di taglio sul singolo connettore di 2,15 kN), con uno scorrimento di 1,6 mm, corrispondente ad una rigidezza elastica di 1,35 kN/mm per ciascun chiodo.

Superato il valore di carico elastico, si assiste un progressivo aumento notevole di spostamento in corrispondenza di limitati aumenti di carico e si entra così nel ramo plastico. La prova ciclica ha testato una coppia di connessioni fino ad un carico massimo pari a 6,90 kN, corrispondente ad una forza di taglio massima su ciascun chiodo pari a 3,45 kN.

Di seguito è riportata una tabella riassuntiva della prova a taglio della connessione chiodata in caso di doppio assito con corrente superiore:

Relazione studiata	Assito diagonale e piatto metallico	Assito diagonale e assito originale
¢ connettori [mm]	4	4
L connettori [mm]	70	70
<i>t</i> assito originale [mm]	22	22
t assito diagonale [mm]	22	22
F _{el} [kN]	4,50	4,30
F_{max} [kN]	6,90	6,90
<i>F</i> a 1 mm [kN]	2,20	2,15
δ_{el} [mm]	1,8	1,6
<i>k_{el}</i> singolo chiodo [kN/mm]	1,25	1,34

Tabella 4.11 - Tabella riassuntiva della prova a taglio su una connessione chiodata del doppio assito con corrente superiore.

A prova ultimata il campione è stato tolto dalla macchina e smontato. Come si può vedere dalla fotografia sottostante [Figura 4.49] il chiodo non sembra aver formato cerniera plastica benché, visti i diagrammi presentati in precedenza, quella fosse l'opzione più verosimile. Questa differenza rispetto alla prova precedente è probabilmente imputabile alla conformazione del provino; il piatto metallico superiore, essendo fissato ad entrambe le estremità, risulta molto rigido e non concede al chiodo grande possibilità di movimento, mentre all'interno delle due tavole di legno sottostanti esso può rifollare e quindi inclinarsi, senza apparentemente plasticizzarsi. Al fine di comprendere se la teoria appena illustrata rispecchi ciò che realmente è accaduto durante la prova, è stato misurato il rifollamento attraverso l'utilizzo di un calibro.



Figura 4.54 - Campione smontato a fine prova.

Dal rilievo effettuato sono stati ricavati i seguenti valori di rifollamento:

Elementi interessati dal rifollamento	δ [mm]
Piatto metallico – faccia superiore (a)	1,24
Piatto metallico – faccia inferiore (b)	0,52
Assito diagonale – faccia superiore (c)	15,45
Assito diagonale – faccia inferiore (d)	11,67
Assito originale – faccia superiore (e)	1,01
Assito originale – faccia inferiore (f)	3,99

Tabella 4.12 - Rifollamenti registrati sui componenti del provino.

Tenendo conto dei rifollamenti registrati e degli spostamenti relativi tra i componenti del provino, è stato possibile determinare la posizione del chiodo al termine della prova [Figura 4.50]. Essa ha confermato l'ipotesi formulata in precedenza, secondo la quale il chiodo infisso nel doppio assito con corrente metallico superiore ruota senza plasticizzarsi.



Figura 4.55 - Configurazione del campione a inizio e fine prova.



Figura 4.56 - Fotografie dei componenti del campione a fine prova.

4.5.6. Confronto tra la soluzioni proposte

La campagna di prove a taglio sulle connessioni chiodate del doppio assito è stata realizzata al fine di definire la soluzione migliore tra quella che vede il posizionamento del piatto metallico al di sopra delle tavole di legno incrociate e quella che ne prevede l'inserimento tra gli assiti. La scelta è stata operata tenendo conto di alcuni parametri fondamentali quali il comportamento irrigidente, la resistenza e la facilità operativa.

Come si evince dal confronto tra i grafici riportati nei paragrafi precedenti [Par. 4.5.4 e Par. 4.5.5], si può notare che le soluzioni, se sollecitate da un'azione sismica, presentano un comportamento simile in termini di resistenza e rigidezza. Infatti, in entrambi i casi la connessione ha comportamento elastico per valori pari a circa 4,20 kN (2,10 kN per chiodo) e il nodo può essere considerato rigido se viene sollecitato da un'azione fino a 2,00 kN (1,00 kN per chiodo).

Il criterio di scelta è stato quindi rappresentato dalla facilità e dalla rapidità operativa. Per tale motivo si è optato per la prima soluzione studiata, ovvero quella che vede il piatto metallico posizionato sulle due tavole d'assito e collegato ad esse mediante dei chiodi: in questo caso la posa del corrente e la connessione con le murature rappresenta la tappa finale della procedura e può essere fatta senza bisogno di prefori o di accortezze particolari. Non è quindi richiesta una manodopera specializzata e il tempo di realizzazione risulta molto contenuto.

5. STUDIO SPERIMENTALE DI UN SOLAIO RINFORZATO MEDIANTE DOPPIO ASSITO INCLINATO

5.1. Finalità della prova

Nel presente capitolo viene descritta la prova in scala reale realizzata col fine di indagare il comportamento di un solaio rinforzato mediante doppio assito inclinato.

Tenendo conto del dimensionamento iniziale [3] e dei risultati ottenuti nelle prove locali svolte in precedenza [4], è stata quindi progettata e realizzata una porzione di impalcato in scala reale. Successivamente tale campione è stato sottoposto ad una serie di cicli di carico di intensità differente che hanno permesso di delinearne il comportamento.

5.2. Caratteristiche geometriche e meccaniche dei componenti principali

I principali componenti utilizzati per la creazione del campione da testare durante prova sono quattro: i travetti lignei, le tavole di assito, il piatto metallico e i chiodi [Figura 5.1].

I travetti lignei utilizzati per riprodurre il solaio originale presentano le seguenti caratteristiche:

- Materiale: legno d'abete bianco nazionale;
- Umidità: 12%;
- Dimensioni: sezione 140x115 mm e lunghezza=2000 mm;
- Finitura: travetti taglio sega, non piallati.

Le tavole d'assito, il piatto metallico e i chiodi sono già stati descritti in precdenza e caratterizzati mediante delle prove locali [4].



Figura 5.1 - Componenti principali del campione testato.

5.3. Descrizione del campione

La prova sperimentale su scala reale è stata condotta su un campione rappresentante una porzione di un impalcato ligneo rinforzato con la tecnica del doppio assito diagonale. In particolare si riferisce alla porzione di bordo del pannello d'anima discusso nel [Par. 3] ed evidenziato in figura.



Figura 5.2 - Porzione di impalcato raffigurante il campione studiato sperimentalmente.

5.3.1. Riproduzione del solaio originale

Anzitutto è stato ricreato il solaio originale [Figura 5.3]: si tratta di un campione di 2,00x2,00 m costituito da travetti di sezione 14x11,5 cm, disposti con interasse pari a circa 50cm, al di sopra dei quali è stato chiodato uno strato assito ortogonale costituito da tavole di sezione 20x2,2 cm. La connessione tra i due elementi lignei è stata realizzata mediante due chiodi in acciaio armonico ϕ 4 per ogni nodo tavola/travetto.



Figura 5.3 - Riproduzione del solaio originale in costruzione.

5.3.2. Dimensionamento e realizzazione del rinforzo

L'anima del pannello è stata dimensionata riprendendo tutti i ragionamenti fatti nel capitolo relativo al dimensionamento iniziale [Cap. 3].

Ipotizzando il campione inserito nell'edificio in muratura descritto in precedenza, è risultato necessario predisporre degli elementi di bordo al fine di permettere la trasmissione dello sforzo di taglio durante la prova e simulare le condizioni al contorno.

Sono state anzitutto disposte delle tavole di assito di sezione 20x2,2 cm con un'inclinazione di 45° rispetto al solaio 2,0x2,0 m sottostante. Successivamente sono stati posizionati i piatti metallici perimetrali di sezione 100x3 mm e infine sono state realizzate le connessioni chiodate. Per facilità costruttiva sono stati predisposti dei prefori sulla lamiera metallica, posizionati su due file sfalsate e con interasse pari a 50 mm, all'interno dei quali sono stati fatti alloggiare dei chiodi ϕ 4x70 mm.

Ogni estremità di ogni tavola è stata chiodata con quattro connettori, per un totale di 15 connettori ogni metro.

Le fasi costruttive sono riportate nel collage di immagini sottostante [Figura 5.4].



Figura 5.4 - Realizzazione del diaframma di piano tramite doppio assito diagonale.

Per evitare eventuali problemi d'instabilità, dato che le tavole di assito diagonale sono state chiodate alla travatura sottostante solo alle estremità, è risultato necessario prevedere delle connessioni distribuite all'interno dell'impalcato al fine di evitare sollevamenti e instabilità. Sono state quindi inserite delle viti ϕ 4x70 mm disposte secondo un interasse di 50 cm e solo in corrispondenza dei travetti [Figura 5.6].

Lo strato d'assito originale risulta chiodato per tutta la lunghezza del solaio in corrispondenza dei travetti e non presenta problemi d'instabilità, ma risulta comunque interessato da una tematica delicata: quella dell'inflessione delle tavole perimetrali caricare ortogonalmente al loro asse.

Quando la prima tavola perimetrale viene sollecitata da un'azione trasversale, data dai chiodi perimetrali, essa può inflettersi e andare a gravare sulle tavole sottostanti, causandone la deformazione.

La risoluzione di questo problema può avvenire secondo due modalità:

- Una prima soluzione è rappresentata dalla collocazione di un piatto metallico adeguato, in grado di raccogliere non solo il momento flettente (funzione di corrente) ma anche l'azione trasversale (funzione finalizzata ad evitare l'inflessione delle tavole perimetrali);

 Una seconda ipotesi risolutiva è invece rappresentata dalla chiodatura delle prime due tavole perimetrali, in modo da evitare la possibilità di inflessione nella ridotta luce rappresentata dall'interasse dei travetti.



Figura 5.5 - Schema delle connessioni tavola perimetrale-travetto.

Si è deciso di optare per la seconda soluzione: è stato così posizionato un numero di chiodi pari a quelli presenti sull'elemento metallico di bordo nell'internasse travetto-travetto. A tali connettori, disposti sulle prime due tavole perimetrali in corrispondenza dei travetti, è stato affidato il compito di assorbile l'azione trasversale e di sostenere, mediante le tavole d'assito sottostanti, l'eventuale inflessione della prima tavola perimetrale, non concedendole possibilità di deformazione.

La connessione è stata realizzata mediante 8 chiodi ϕ 4x70 mm per ogni estremità, distribuiti a livello dei travetti nelle prime due tavole perimetrali di ogni estremità del solaio , per un totale di 48 chiodi aggiuntivi [Figura 5.6].



Figura 5.6 - Disposizione delle viti per prevenire l'instabilità delle tavole diagonali (sx) e chiodi per evitare l'inflessione delle tavole ortogonali ai travetti (dx).

Di seguito viene riportato uno schema riassuntivo delle fasi di realizzazione del campione.



Figura 5.7 - Schema delle fasi costruttive del campione

5.4. Descrizione del banco di prova e della strumentazione utilizzata

Il banco di prova è costituito da una cornice rigida autoequilibrata all'interno della quale è posizionato il campione.

La struttura esterna è composta da una trave HEB500 di lunghezza pari a 6m, con funzione di base, da due montanti laterali HEB200 di altezza pari a 3m e da una trave HEB200 di lunghezza pari a 4m, con funzione di elemento di chiusura superiore [Figura 5.8]. Al fine di evitare il ribaltamento fuori piano del banco sono previsti degli ancoraggi ad una trave posteriore tramite dei massicci profili in acciaio di lunghezza pari a 1,5m [Figura 5.8 a)]. Per impedire eventuali sbandamenti del banco nel suo piano, sono predisposti tre puntoni inclinati, imbullonati alla trave di base e ai montali verticali [Figura 5.8 b), c)].



Figura 5.8 - Immagini del banco di prova.

Il campione è posizionato all'interno del banco di prova in modo che i travetti risultino ortogonali ai montanti verticali ed i correnti siano collocati in asse con la trave HEB500 di base.

I vincoli più significativi sono rappresentati da incastri e cerniere: i primi hanno funzione di impedire lo scorrimento del campione ed i secondi di consentirne la rotazione rigida nel piano.

Gli incastri sono realizzati mediante cordoni di saldatura, dimensionati sulla base della sollecitazione di progetto. Essi sono predisposti al collegamento dell'elemento di bordo orizzontale inferiore alla trave HEB500 e dell'elemento di bordo orizzontale superiore ad un profilo IPE120, disposto in asse con il piatto metallico, sulla sommità del campione.

I correnti verticali sono saldati a due piatti metallici 10x100 mm che presentano delle riduzioni di sezione alle estremità, finalizzate alla creazione di quattro cerniere. Allo scopo di non ostacolare la rotazione rigida, i correnti metallici verticali presentano degli intagli che evitano il contatto sia con i piatti orizzontali, sia con i profili HEB500 e IPE120 [Dettaglio 1-Figura 5.9].

Come visibile dalla rappresentazione del banco di prova [Dettaglio 2-Figura 5.9], è previsto un sistema per evitare meccanismi fuori piano del campione, sollecitato da azione orizzontale. Il controventamento è realizzato tramite un profilo tubolare 50x100 mm di spessore pari a 5 mm, imbullonato al banco di prova mediante due barre M20 e collegato al campione con due perni filettati M12, imbullonati al profilo IPE120 in sommità del solaio.

Per evitare che il tubolare influisca sulla distribuzione del carico nel campione, i due perni M12 presentano delle riduzioni di sezione [Dettaglio 2-Figura 5.9] con uno spessore finale di 3 mm. Tale accorgimento permette di schematizzare le barre come due bielle, che assecondano il movimento del provino e ne evitano il fuori piano.

La sollecitazione simulante il sisma è fornita da un martinetto oleodinamico a doppio effetto, ancorato al montante verticale destro mediante una piastra bullonata. Lo strumento sollecita in spinta e in trazione una trave IPE120, posizionata sulla sommità del campione, la quale trasmette, mediante dei cordoni di saldatura, l'azione orizzontale agli elementi del solaio in grado di sopportarla. La pressione massima d'esercizio dello strumento è pari a 700 bar, a cui corrisponde una forza di circa 300 kN in spinta e 150 kN in trazione. Il pistone prevede una corsa massima di 260 mm.

Al fine di determinare nella maniera più accurata possibile l'entità della forza agente sul campione, viene posizionata una cella di carico tra il martinetto e l'elemento sollecitato. Il trasduttore è in grado di leggere un carico massimo di 100 kN.

Per avere un riscontro continuo durante la prova, l'azione sollecitante viene comunque tenuta sotto controllo da due trasduttori di pressione di 1000 bar in spinta e di 200 bar in trazione.

113



Figura 5.9 - Vista, sezione e dettagli del banco di prova.

5.4.1. Descrizione della strumentazione utilizzata

Il campione è strumentato mediante due tipologie di misuratori: un trasduttore induttivo e due trasduttori potenziometrici.

Per misurare lo spostamento in sommità del solaio viene utilizzato un trasduttore induttivo LVDT da 100 mm [1-Figura 5.10], con ritorno a molla. Lo strumento è collocato su un supporto esterno al banco, per non risentire di eventuali spostamenti o rotazioni, ed è fissato mediante una base magnetica.

Per misurare le deformazioni di una singola tavola d'assito viene utilizzato un trasduttore potenziometrico da 250 mm [2-Figura 5.10], disposto sulla diagonale del campione parallela all'asse delle tavole (diagonale a) e fissato sull'assito.

Per stimare l'allungamento della diagonale ortogonale agli assi delle tavole (diagonale b), viene disposto un altro trasduttore potenziometrico da 250 mm [3-Figura 5.10], anch'esso fissato sull'assito.

Volendo inoltre stimare gli scorrimenti relativi tra elemento metallico e assito diagonale e tra tavola e tavola, si opta per l'utilizzo di carta millimetrata tagliata lungo il piano di scorrimento e posizionata su ogni singolo nodo. La scelta di non affidarsi a trasduttori per rilevare questo tipo di dato, è dettata dalla difficoltà operativa di disporre un numero così elevato di strumenti.

La carta millimetrata è posizionata su ogni nodo piatto-tavola, sia in orizzontale che in verticale [4,5-Figura 5.10]. Inoltre sono studiati anche i piani di scorrimento tavola-tavola, disposti lungo la diagonale a [6-Figura 5.10]. La misurazione degli scorrimenti viene effettuata mediante ricostruzione fotografica a posteriori.

115



Figura 5.10 - Banco di prova strumentato.

5.5. Conduzione della prova

Il solaio rinforzato mediante doppio assito è stato sollecitato dall'azione orizzontale fornita dal martinetto oleodinamico, secondo lo schema di reazioni riportato di seguito [Figura 5.11]. Come visibile, data l'eccentricità del carico, si genera un momento parassita che è stato considerato trascurabile, data la sua limitata entità.

Il campione è stato sollecitato da cicli di carico-scarico-inversione del carico di natura statica, per diversi livelli di spostamento orizzontale. I primi cicli sono stati condotti in campo elastico, la prova è proseguita fino al raggiungimento dell'azione di progetto (30 kN) ed è stata poi spinta fino ad un carico doppio rispetto a quello di progetto (60 kN), al fine di testare il comportamento dei chiodi oltre una F_{ch} pari a 1kN.

La scelta di condurre la prova secondo quanto descritto ha permesso di studiare il comportamento del campione in diverse situazioni, consentendo quindi di comprendere a fondo la risposta sismica di un solaio ligneo rinforzato mediante la tecnica del doppio assito.



Figura 5.11 - Schema delle azioni agenti sul campione durante la prova.

5.6. Risultati della prova

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti per cicli di carico-scarico-inversione di carico, sia in spinta (+) che in trazione (-), per vari livelli di spostamento in sommità del campione.

Inizialmente sono stati condotti quattro cicli simmetrici, per valori di spostamento in sommità pari a 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm e 3,0 mm e sono state ricavate le curve carico spostamento in sommità, all'allungamento della diagonale a e della diagonale b; viene riportato anche il rapporto tra lo spostamento massimo e l'altezza del pannello (*drift*). La figura [Figura 5.12] si riferisce ad un carico modesto, indicativamente corrispondente ad una condizione di esercizio. Dalla curva carico-spostamento in sommità si nota un comportamento del provino simmetrico ma non perfettamente elastico. Come verrà discusso in seguito infatti, le connessioni chiodate non sono sollecitate uniformemente dall'azione di taglio impressa dal martinetto e quindi anche carichi limitati possono essere in grado di generare rifollamento in corrispondenza dei chiodi che lavorano maggiormente.

Sono stati condotti cicli carico-scarico e inversione di carico in particolare la curva caricospostamento in sommità del provino mostra uno spostamento pari a 0,5 mm, ovvero un *drift* pari 0,025%, con un carico prossimo ai 5 kN [punto A] e uno spostamento di 1,5 mm per un carico di circa 15 kN [punto B]. Il terzo ciclo è stato condotto fino ad uno spostamento prossimo ai 2,5 mm, *drift* dello 0,125%, con corrispondente carico pari a 23 kN [punto C]. Il quarto ciclo ha raggiunto un carico vicino a 27 kN, con uno spostamento pari a 3 mm, ovvero un *drift* di 0,150% [punto D]. Il valore di rigidezza iniziale del campione, stimato a partire dall'inclinazione della retta tangente le curve del grafico, in campo elastico, è circa pari a k=10 kN/mm.



Figura 5.12 - Curva carico-spostamento in sommità rappresentante i primi quattro cicli della prova.

Gli allungamenti delle diagonali sono geometricamente calcolabili secondo lo schema sottostante [Figura 5.13].



 η = spostamento della campione in sommità) Δl_a = allungamento della "diagonale a" Δl_b = allungamento della "diagonale b"

$$\Delta l_a = -\Delta l_b = -\eta \frac{\sqrt{2}}{2}$$

Figura 5.13 - Schema delle relazioni esistenti tra lo spostamento in sommità e la deformazione delle diagonali.

I valori degli allungamenti sono stati determinati dalla lettura di due trasduttori potenziometrici disposti lungo le diagonali e successivamente confrontati con i valori teorici. In figura [Figura 5.14] è riportata la curva carico-deformazione riferita alla "diagonale a" e alla "diagonale b" per i primi quattro cicli di carico descritti in precedenza.

Ad uno spostamento in sommità pari a 0,5 mm, ovvero per un carico di circa 5 kN, corrisponde un accorciamento della "diagonale a" pari a -0,055 mm [Punto A_a] e un allungamento della "diagonale b" pari a 0,25 mm [Punto B_a]. Il secondo ciclo, condotto per uno spostamento in sommità pari a 1,5 mm e un carico vicino ai 15 kN, ha rilevato un accorciamento della "diagonale a" pari a -0,2 mm [Punto A_b] e un allungamento della "diagonale b" pari a 1,05 mm [Punto B_b]. Quando lo spostamento in sommità raggiunge i 2,5 mm, ovvero il campione è sollecitato da un carico pari a 23 kN, la "diagonale a" rileva un accorciamento di -0,3 mm [Punto A_c] e la "diagonale b" pari a 1,6 mm [Punto B_c]. Il quarto ciclo, condotto per uno spostamento in sommità pari a 3,0 mm e un carico vicino ai 27 kN, ha rilevato un accorciamento della "diagonale a" pari a -0,35 mm [Punto A_d] e un allungamento della "diagonale b" pari a 2,05 mm [Punto B_d].



Figura 5.14 - Curva carico-allungamento delle diagonali rappresentante i primi quattro cicli della prova.

Al fine di confrontare il valore teorico della deformazione delle diagonali, ricavato dalla relazione geometrica [Figura 5.13], con i valori determinati sperimentalmente, si riporta una tabella riassuntiva dei primi quattro cicli della prova.

Carico	Spostamento	Drift	Allungamento	o sperimentale	Allungamen	to geometrico
	in sommità		Allungamento	Allungamento	Allungamento	Allungamento
[kN]	[mm]	[%]	"diagonale a"	"diagonale b"	"diagonale a"	"diagonale b"
	[,0]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
5	0,5	0,025	-0,06	0,25	-0,35	0,35
15	1,5	0,075	-0,25	1,05	-1,10	1,10
23	2,5	0,125	-0,30	1,60	-1,80	1,80
27	3,0	0,150	-0,35	2,05	-2,10	2,10

Tabella 5.1 - Tabella riassuntiva degli spostamenti rilevati durante i primi quattro cicli della prova.

In tabella è stata messa in evidenza una differenza considerevole tra il valore di allungamento della "diagonale a" rilevato durante la prova e quello teorico, determinato dalla relazione geometrica; valori confrontabili sono invece quelli riferiti alla deformazione della "diagonale b". Questo è dovuto al fatto che lo strumento indicato come "diagonale a" è disposto lungo un'unica tavola d'assito, mentre lo strumento indicato come "diagonale b" è ortogonale a tutte le tavole di rinforzo disposte nel solaio. Lungo la "diagonale a" viene quindi rilevata solo la deformazione della tavola che risulta modesta rispetto a quella della connessione che invece è tenuta in considerazione sulla "diagonale b". E' quindi possibile affermare che le deformazioni si concentrano in corrispondenza del chiodi e sono principalmente determinate dalla deformazione elastica della connessione e dal successivo rifollamento del legno, risultando poco rilevanti se calcolate sulla singola tavola.

Il campione è stato successivamente sollecitato a carichi prossimi a quelli indicativamente significativi per gli stati limite ultimi per il progetto [Figura 5.15]. Il quinto ciclo rileva uno spostamento in sommità di circa 4 mm, ovvero un *drift* pari allo 0,2%, corrispondente ad un carico pari a 35 kN. Considerando esattamente il carico di progetto allo SLU F_d = 30 kN si misura uno spostamento in sommità pari a 3,25 mm, *drift* di 0,16% [Punto A]. Possiamo considerare tale valore accettabile dal punto di vista delle deformazioni; considerando un *drift* pari allo 0,2% come limite di esercizio della struttura, il carico di progetto sollecita l'impalcato senza causare danni rilevanti.

Il sesto ciclo, condotto fino ad uno spostamento in sommità dell'ordine di 5 mm, ovvero un *drift* di 0,25%, rileva un carico agente sul campione pari a 38 kN. Il settimo ciclo presenta uno spostamento in sommità pari a 7 mm, ovvero un *drift* dello 0,35%, sollecitando il campione ad un carico pari a 46 kN.



Figura 5.15 - Curva carico-spostamento in sommità relativa all'interva prova.

Fino al settimo ciclo, la risposta del solaio è simmetrica, come visibile in figura [Figura 5.15].

Quando il carico risulta essere doppio rispetto a quello di progetto, ovvero pari a 60 kN, lo scorrimento a spinta è dell'ordine di 9,30 mm [Punto B], mentre quello a trazione di 15,5 mm. La differenza a livello di *drift* risulta circa pari a 0,30%.

Di seguito viene riportato il diagramma carico-allungamento riferito alle due diagonali, relativamente a tutti gli otto cicli della prova [Figura 5.16].



Figura 5.16 - Curva carico-spostamento relativa alle diagonali di tutti i cicli di carico della prova.

Durante tutta la durata della prova sono stati monitorati gli scorrimenti relativi tra i diversi componenti, mediante l'utilizzo di stadiole millimetrate poste a livello di un elemento di bordo orizzontale, verticale e di una diagonale. I valori più significativi sono stati rilevati a livello della tavola di assito posta sulla diagonale, in corrispondenza dell'angolo piatto metallico-tavola.

Di seguito viene riportato il risultato della rielaborazione fotografica dei movimenti relativi di tre nodi orizzontali [1.O, 2.O, 3.O di Figura 5.17] e tre verticali [1.V, 2.V, 3.V di Figura 5.17]. Non viene riportata la rielaborazione delle stadiole posizionate lungo la "diagonale b" in quanto poco significativa. I diagrammi sono stati costruiti analizzando quattro fotografie per ogni ciclo di carico completo e sono quindi da considerarsi qualitativamente. Nonostante ciò, le curve permettono di ricavare un'informazione importante: gli scorrimenti in direzione x e y sono dello stesso ordine di grandezza e crescono in corrispondenza dell'aumentare della lunghezza della tavola diagonale.



Figura 5.17 - Misuratori millimetrati oggetto di rielaborazione fotografica.

Di seguito si riportano le curve carico-spostamento relative agli scorrimenti tra assito e piatto metallico orizzontale inferiore. Lo scorrimento relativo sotto carico massimo, pari a 60 kN, è di 4 mm per l'indicatore 1.O [Figura 5.19], di 2,1 mm per l'indicatore 2.O [Figura 5.20] e di 0,9 mm per l'indicatore 3.O [Figura 5.21]. Si tratta quindi di scorrimenti crescenti spostandosi verso il nodo di sinistra che permettono di ipotizzare un andamento degli sforzi non uniforme all'interno dell'assito, con concentrazioni maggiori in prossimità delle tavole con lunghezza più considerevole [Figura 5.18].

Stessi valori e considerazioni sono da applicarsi anche alle curve carico-spostamento relative agli scorrimenti tra assito e piatto metallico verticale sinistro [Figura 5.22, Figura 5.23, Figura 5.24].

Dalle fotografie si è inoltre rilevato uno spostamento del diagonale in direzione ortogonale al piatto metallico, quantitativamente analogo allo scorrimento oggetto di misura. Il diagonale ha quindi avuto un movimento relativo lungo il suo asse, cioè a 45% rispetto al piatto metallico.



Figura 5.18 - Andamento degli sforzi di taglio all'interno del solaio rinforzato con doppio assito.



Figura 5.19 - Curva carico-spostamento relativa agli scorrimenti tra piatto metallico orizzontale e assito (1.0)



Figura 5.20 - Curva carico-spostamento relativa agli scorrimenti tra piatto metallico orizzontale e assito (2.0).



Figura 5.21 - Curva carico-spostamento relativa agli scorrimenti tra piatto metallico orizzontale e assito (3.0).



Figura 5.22 - Curva carico-spostamento relativa agli scorrimenti tra piatto metallico verticale e assito (1.V).



Figura 5.23 - Curva carico-spostamento relativa agli scorrimenti tra piatto metallico verticale e assito (2.V).



Figura 5.24 - Curva carico-spostamento relativa agli scorrimenti tra piatto metallico verticale e assito (3.V).

6. CONCLUSIONI

La tecnica del doppio assito è utilizzato per il rinforzo sismico per gli impalcati lignei di edifici esistenti. Tale soluzione consente la realizzazione del diaframma di piano e attiva il comportamento scatolare della struttura. Molti sono gli aspetti positivi che contraddistinguono l'utilizzo del doppio assito. Primo fra tutti il peso limitato che non aumenta in maniera sensibile i carichi verticali e non amplifica le azioni sismiche. Non meno rilevanti sono poi la reversibilità dell'operazione e la limitata invasività sulla struttura esistente.

Per i vari aspetti positivi che la caratterizzano, la tecnica del doppio assito rappresenta una soluzione sempre più proposta negli interventi sul costruito. Il diaframma di piano viene realizzato secondo lo schema anima-correnti-ripartitori¹⁹, affidando la funzione dell'anima agli strati di tavole sovrapposte, quella di corrente-ripartitore a dei profili perimetrali metallici, collegati alle pareti mediante degli spinotti. Il nuovo strato di tavole può essere posizionato ortogonalmente o con un'inclinazione di 45° rispetto ai travetti e all'assito e risulta collegato ad essa mediante chiodi o viti autofilettanti per legno.

Il presente lavoro è stato finalizzato allo studio del comportamento del doppio assito nelle sue differenti realizzazioni.

Dopo aver effettuato un primo dimensionamento è stata messa in luce una differenza costruttiva tra il doppio assito incrociato e il doppio assito inclinato. Considerando un solaio di dimensioni ordinarie (4x5 m), il numero di chiodi necessari è stato stimato di circa 2'000, disposti uniformemente, per il caso di assito incrociato a 90° e di circa 300 chiodi, disposti solo sul perimetro, per quello inclinato a 45°. La rilevante differenza a livello di facilità costruttiva e di tempo di realizzazione ha permesso di prediligere lo studio sperimentale della tecnica del doppio

¹⁹ Giuriani E., "L'organizzazione degli impalcati per gli edifici storici", L'Edilizia, Speciale Legno Strutturale, n. 134, 30-43, 2004.

tavolato realizzato con un secondo strato di assito disposto con un'inclinazione di 45° rispetto all'originale.

La soluzione è stata studiata mediante delle campagne di prove locali e una prova di taglio in scala reale.

Una prima fase di prove locali è stata condotta al fine di caratterizzare i singoli materiali utilizzati nella modellazione su scala reale: sono state effettuate prove di taglio e trazione su chiodi e piatto metallico.

Una seconda tipologia di prove locali è stata finalizzata alla determinazione della resistenza a rifollamento per una tavola di assito con chiodo sollecitato parallelamente, ortogonalmente o con un'inclinazione di 45° rispetto alla fibratura del legno.

I risultati ottenuti hanno permesso di evidenziare che l'inclinazione della forza determina una riduzione della resistenza a rifollamento del legno di circa il 30% se la sollecitazione agisce a 90° rispetto alle fibre del legno e di circa il 20% per il caso di forza inclinata a 45°.

Una terza fase di prove locali ha studiato il comportamento della connessione chiodata a taglio, analizzando gli scorrimenti relativi tra corrente metallico, assito diagonale e assito originale. Sono state studiate due differenti soluzioni di realizzazione della connessione: la prima con posizionamento del corrente metallico tra la tavola di assito originale e quella diagonale, la seconda con piatto metallico superiore al doppio strato di assito.

I risultati hanno mostrato un comportamento simile tra le due soluzioni proposte, caratterizzato da degli scorrimenti relativi contenuti in prossimità di carichi di progetto. Per un flusso di taglio pari a circa 15 kN/m, sono stati registrati scorrimenti relativi dell'ordine del millimetro. Questo ha permesso di stabilire un valore indicativo di forza da affidare ad ogni chiodo per assicurare un comportamenti rigido del solaio, fissato a $F_{ch,max}$ =1 kN.

A partire dai risultati forniti dalle prove locali, è stato effettuato un dimensionamento del campione in scala reale studiato attraverso una prova ciclica a taglio.

Il provino, costituito da un solaio 2x2 m rinforzato con doppio assito inclinato e correnti, è stato inizialmente sollecitato in campo elastico fino al raggiungimento dell'azione di progetto (F_d=30 kN). In corrispondenza di tale valore il campione ha presentato spostamenti limitati e in linea con quanto mostrato dalle prove locali (*drift* in sommità del campione pari a 0,16% e scorrimento relativo tra assito ed elemento metallico di bordo pari a circa 1 mm). Il campione è stato poi sollecitato da un'azione doppia rispetto a quella di progetto (F_{max}=60 kN), fornendo valori di

spostamento accettabili (*drift* in sommità del campione pari a circa 0,70% e scorrimento relativo tra assito ed elemento metallico di bordo pari a circa 4 mm).

Dallo studio sperimentale eseguito si evince che il doppio assito è una tecnica di rinforzo sismico di grande efficacia e facilmente realizzabile, a patto che siano tenuti in considerazione i seguenti aspetti:

- presenza di unioni metalliche: a differenza di quanto visto per i pannelli multistrato, il rinforzo sismico mediante doppio assito non prevede l'utilizzo di collanti, risultando più conservativo e in linea con le tecniche tradizionali. L'utilizzo di connessioni chiodate assicura inoltre una capacità irrigidente e una buona resistenza;
- collaborazione tra doppio assito, correnti e ripartitori: il doppio assito, assolve solo la funzione di anima all'interno del diaframma di piano, necessitando di correnti e ripartitori al fine di poter rappresentare un rinforzo sismico adeguato;
- collaborazione tra doppio assito e travetti originali: al fine di limitare l'inflessione delle tavole perimetrali parallele ai bordi è necessario prevedere opportuni collegamenti chiodati concentrati nelle prime tavole perimetrali, che connettono le tavole ai travetti [Par. 5.3.2];
- collaborazione tra doppio assito e muratura: al fine di attivare una risposta sismica globale, è necessario che l'orizzontamento rinforzato mediante doppio assito sia adeguatamente connesso alla muratura. Tali unioni avvengono mediante l'utilizzo di spinotti, saldati al corrente metallico e entranti nella muratura;

Uno sviluppo futuro di questo lavoro potrebbe essere rappresentato dallo studio numerico del problema, sfruttando i risultati sperimentali ottenuti. Questo permetterebbe di generalizzare quanto riportato in questa ricerca a tutti gli impalcati lignei, fornendo un metodo di dimensionamento sempre applicabile.

130

BIBLIOGRAFIA

AA.VV, "Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura", 2007;

Baldessari C., *"In plane behaviour of differently refurbished timber floors"*, Tutor: Piazza M., Doctoral school in structural engineering modelling, preservation and control of materials and structures, Università degli Studi di Trento, 2010;

Bresolin M., "Effetto di diverse tecniche di rinforzo di solai lignei sul comportamento sismico di edifici in *muratura*", Rel: Scotta R., Correl: Pozza L., Università degli Studi di Padova, a.a 2012/2013;

Ceccotti A., "Verifiche e consolidamenti delle strutture lignee in zona sismica", Il Manuale del Legno Strutturale, Mancosu Editore, Roma, vol. IV, 2004;

Ceccotti A., Follesa M., Lauriola M.P., "Le strutture di legno in zona sismica", Clut, 2007;

CNR-DT, "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture in Legno", Roma, 2007;

De Maria A., *"Costruzioni in muratura e meccanismi di collasso"*, Dispensa fornita nell'ambito del corso di teoria delle strutture, Università degli Studi di Perugia;

Doglioni F., "Codice di pratica (linee guida) per la progettazione degli interventi di riparazione, miglioramento sismico e restauro dei beni architettonici danneggiati dal terremoto umbro-marchigiano del 1997", BUR Marche edizione straordinaria n.15 del 29/09/2000;

Faccio P., *"Il percorso della conoscenza"*, Dispense del prof. Paolo Faccio, Università IUAV di Venezia, Diapartimento di Costruzioni dell'Architettura, 2008;

Favero F., Simonelli F., Pianizzola A., "Un impalcato rigido: il solaio legno-legno", FIP Industriale Spa, Enco Journal n. 29; Gattesco N., Marcorini L., Benussi F., "Intervento sui solai lignei per l'adeguamento sismico di edifici storici con tecniche caratterizzate da elevate reversibilità", PRIN, 2006;

Giuffrè A., "Letture sulla Meccanica delle Murature Storiche", Edizioni Kappa, 1991;

Giuriani E., "L'organizzazione degli impalcati per gli edifici storici", L'Edilizia, Speciale Legno Strutturale, n. 134, 30-43, 2004;

Giuriani E., "Solai in legno con lastra collaborante: criteri di dimensionamento", L'Edilizia, Speciale Legno Strutturale, n. 4, 2002;

Giuriani E., Marini A., "Wooden roof box structure for the anti – seismic strengthening of historic buildings", International Journal of Architectural Heritage – Conservation, Analysis and Restoration, vol. 2, 2008;

Giuriani E., Marini A., Plizzari G., "Shear behavior of wooden floors strengthened by stud connected wooden planks", Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Brescia, Technical Report n. 7, 2002;

Giuriani E., Marini A., Plizzari G., "Comportamento di solai in legno rinforzati con assito-diaframma per resistere alle azioni sismiche", V Workshop Italiano sulle Strutture Composte, Salerno, 2002;

Modena C., "Criteri di progetto per il miglioramento sismico degli edifici storici", ENEA, Roma, 2010;

Pederzolli S., *"Prove sperimentali nel piano di solai lignei diversamente rinforzati"*, Rel: Piazza M., DIMS, Università degli Studi di Trento, a.a 2007/2008;

Piazza M., *"Interventi di consolidamento con l'uso di elementi meccanici di collegamento: solai misti legno-legno"*, *"Il manuale del legno, vol. IV: Interventi sulle strutture"*, 108-127, 2004;

Piazza M., *"Interventi di restauro su strutture lignee. Parte I - Sperimentazione e progettazione"*, Università degli Studi di Trento, Enco Journal n. 38;

Piazza M., Tomasi R., Modena R., "Strutture in legno. Materiale, calcolo e progetto secondo le nuove normative europee", Hoepli, 2005;

132

Piazza M., Turrini G.," *Consolidamento e restauro di strutture portanti lignee*", L'Edilizia, n.4, 195-202, 1991;

Piazza M., Turrini G.,"Una tecnica di recupero statico dei solai in legno", Recuperare, 5, 6, 7, Milano, 1983;

Rodegher C., "Analisi del comportamento di piano di orizzontamenti lignei soggetti ad azione sismica", Rel: Piazza M., Tosoni R., Correl: Giongo I., DIMS, Università degli Studi di Trento, a.a 2010/2011;

UNI EN 10025-2, "Prodotti laminati a caldo di acciai per impieghi strutturali - Parte 2: Condizioni tecniche di fornitura di acciai non legati per impieghi strutturali", UNI, Milano, 2005;

UNI EN 383, "Timber structures. Test methods. Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners", UNI, Milano, 2007;

UNI EN ISO 15630-1, "Acciaio per calcestruzzo armato e calcestruzzo armato precompresso - Metodi di prova", UNI, Milano, 2010;

UNI EN ISO 6892-1, "Materiali mettallici - Prova di trazione", UNI, Milano, 2009;

Valluzzi M.R., Garbin E., Dalla Benedetta M., Modena C., "Experimental characterization of timber floors strenghened by in-plane improvement techniques", Università degli Studi di Padova, 2013.

"Diaframmi di piano antisismici di impalcati lignei realizzati con doppio assito", Tesi di laurea specialistica a ciclo unico in Ingegneria Edile-Architettura, Università degli Studi di Brescia, DICATAM, Laureanda Molinari A., Relatore Giuriani E., Correlatori Cominelli S., Marchina E., A.A. 2012-2013