

IV Workshop Italiano sulle Costruzioni Composte

Palermo 23 – 24 Novembre 2000

STUDIO SPERIMENTALE SUL COMPORTAMENTO DI SOLAI IN LEGNO RINFORZATI CON LASTRE DI ACCIAIO PER RESISTERE ALLE AZIONI SISMICHE

E. Giuriani¹ e G.A. Plizzari¹

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Brescia.

ABSTRACT

In the present paper the seismic behavior of existing wooden floors strengthened by a thin steel plate has been studied. The technique mainly concerns interventions on historical buildings where a “dry technique” may be particularly useful. To avoid to weld the steel plates that could cause damage or fire, high strength nails are used for the joints. In order to avoid buckling, the thin plates were connected to the wooden floor by means of steel screws.

The experimental results show the significant values of the stiffness and of the ultimate load of the strengthened wooden floor. The comparison between the experimentally and theoretically determined maximum load also provide useful information for practical applications. The small values of the experimental slip between joints further confirms the validity of the proposed technique.

1 INTRODUZIONE

Il recupero degli edifici storici richiede frequentemente interventi sulle strutture, non solo per il loro ripristino funzionale ma anche per l'adeguamento a carichi più gravosi ed alle azioni sismiche. Tra i diversi elementi strutturali di un edificio storico, i solai in legno sono quelli che più frequentemente richiedono interventi di consolidamento statico. Questa esigenza ha incentivato negli ultimi anni lo sviluppo di numerose tecniche di rinforzo e di irrigidimento mirate soprattutto al controllo della deformabilità oltre che all'aumento della capacità portante.

Tra le tecniche di recupero proposte in letteratura è significativa quella che ricorre ad una sottile lastra di calcestruzzo solidarizzata ai travetti in legno mediante opportuni connettori (Piazza e Turrini, 1983; Ronca et al., 1991; Giuriani e Frangipane, 1993; Gelfi et al., 2001). Altre tecniche simili prevedono l'irrigidimento mediante lastre di acciaio (Gelfi e Giuriani, 2001) o di elementi aggiuntivi in legno, collegati ai travetti esistenti con connettori a piolo (Giuriani, 1997; Modena et al., 1997).

Il rinforzo con lastra in calcestruzzo è particolarmente adatto per i solai di geometria irregolare, è economica ma richiede una particolare attenzione durante il getto per proteggere il solaio esistente che potrebbe essere danneggiato dal contatto con l'acqua presente nel calcestruzzo. Un secondo aspetto che può limitare i vantaggi di questa tecnica riguarda il peso che

frequentemente deve essere ridotto il più possibile sia per contenere le sollecitazioni sulle murature e sulle fondazioni sia per limitare le azioni sismiche. La lastra di calcestruzzo, che usualmente sostituisce il sottofondo esistente, non comporta una riduzione significativa del carico portato.

Nel caso di rinforzo con lastra di acciaio, lo spessore ed il peso dell'elemento aggiunto sono invece trascurabili. Accanto a questi vantaggi occorre però rilevare che questa tecnica si presta solo per solai con geometrie regolari e risulta economicamente più onerosa.

Le tecniche citate precedentemente sono state prevalentemente proposte per il rinforzo di solai in legno soggetti a carichi verticali.

Le stesse tecniche possono essere utilmente impiegate anche per il miglioramento sismico in quanto consentono di realizzare i diaframmi di piano in grado di trasferire le azioni sismiche orizzontali alle pareti resistenti al taglio. Naturalmente il miglioramento sismico richiede che, oltre al rinforzo del solaio del singolo vano, venga progettata l'organizzazione dell'intero edificio ricorrendo ad opportuni incatenamenti perimetrali oltre che a connessioni tra lastre e murature portanti che devono trasferire le azioni di taglio ed evitare il distacco della muratura. I diaframmi di piano sono realizzati con pannelli ed elementi perimetrali. Nello schema usualmente accettato della suddivisione dei compiti, i pannelli devono resistere al taglio mentre gli elementi perimetrali devono resistere alle azioni flessionali di piano.

Per quanto risulta agli Autori pochi sono i lavori disponibili in letteratura sul comportamento dei solai rinforzati sottoposti alle azioni di taglio dovute al sisma. Solo per i solai in legno e calcestruzzo sono disponibili alcuni risultati sperimentali che mostrano l'efficacia dell'intervento e forniscono un riferimento per il loro dimensionamento (Giuriani et al., 1998). Anche sulle connessioni tra muratura e soletta sono disponibili alcuni studi relativi ai pioli soggetti a taglio (Felicetti et al., 1992) ed agli ancoraggi soggetti a trazione (Del Piccolo et al., 1993; Giuriani et al., 1999) che possono essere di supporto alla progettazione.

Il presente lavoro si propone di studiare sperimentalmente il comportamento a taglio di solai rinforzati con lamiera di acciaio di piccolo spessore. Lo studio è rivolto soprattutto agli interventi su edifici di importanza storica per i quali le saldature non vengono normalmente accettate perché potrebbero essere causa di danni o di incendio. La tecnica proposta prevede l'utilizzo di connessioni chiodate tra le lamiere ed è stata adottata nella progettazione per il miglioramento sismico del palazzo della Loggia di Brescia. Nel presente lavoro, oltre a studiare l'efficacia delle connessioni chiodate per il trasferimento del taglio, si affronta anche il problema del collegamento all'assito esistente per evitare i fenomeni di instabilità delle lamiere.

2 MODELLAZIONE SPERIMENTALE E BANCO DI PROVA

Le prove sperimentali sono state condotte su un provino costituito da una porzione di solaio analogo, per dimensioni e tecnica costruttiva, all'impalcato progettato per il Palazzo della Loggia di Brescia. La geometria assunta può però essere considerata significativa anche per i comuni solai in legno e pertanto i risultati costituiscono un riferimento di validità più generale.

L'impalcato di riferimento è realizzato con travetti in legno con larghezza di 8 cm ed altezza pari a 12 cm, posti ad un interasse di 64 cm con soprastante assito da 4 cm. Per impedire l'imbozzamento sotto l'azione tagliente, la lamiera è fissata all'assito in legno con viti poste a passo costante nelle due direzioni (Figg. 1 e 2a). I provini hanno dimensioni di 100x250 cm e sono costituiti da due travetti disposti in direzione longitudinale su cui sono fissate le tavole dell'assito e la lamiera (Fig. 3a).

A causa delle limitate dimensioni delle lamiere è necessario realizzare giunti di unione tra

le lamiere con chiodi ad alta resistenza con 3.7 mm di diametro, infissi entro fori da 3.2 mm di diametro e posizionati ad un passo di 25 mm. Per ridurre i tempi di infissione dei chiodi, è stata valutata anche una tecnica alternativa con chiodi a carica esplosiva che in prove preliminari hanno fornito risultati del tutto simili ai chiodi infissi.

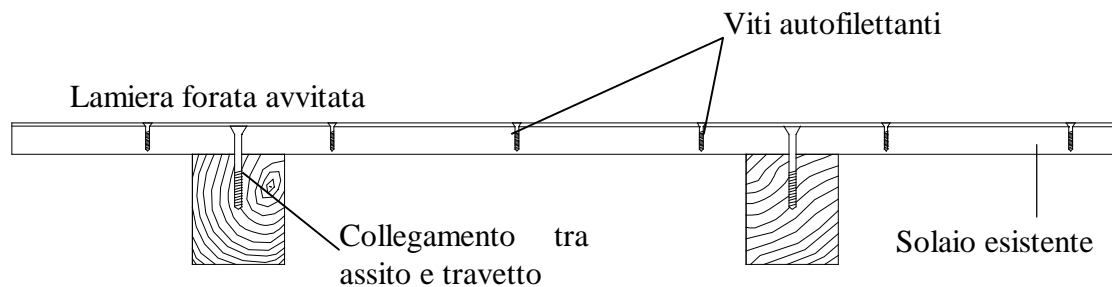


Fig. 1. Tecnica di consolidamento in studio con i diversi collegamenti.

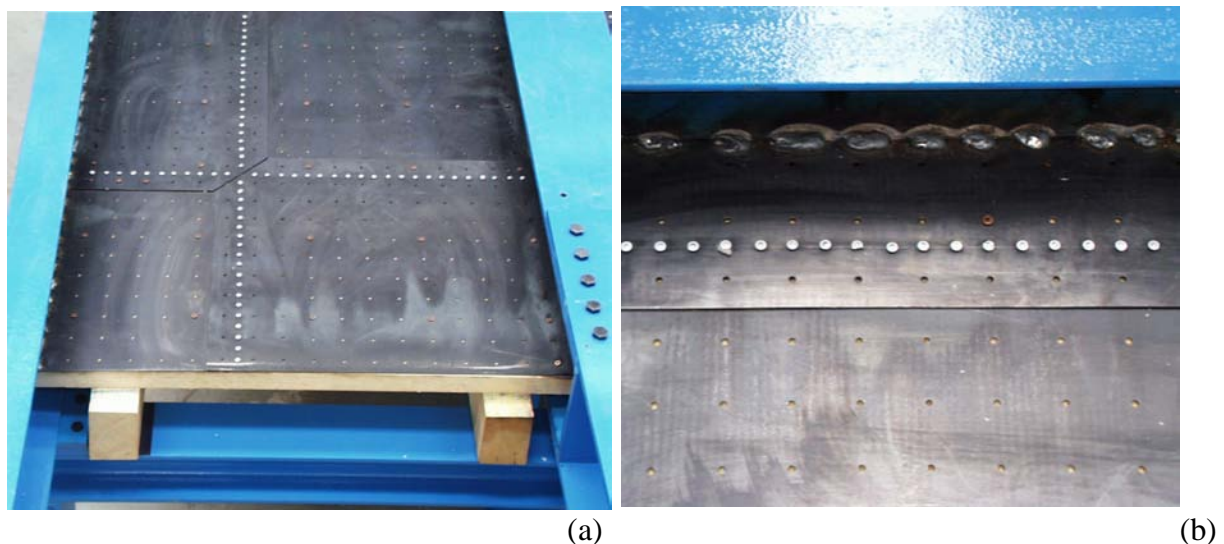


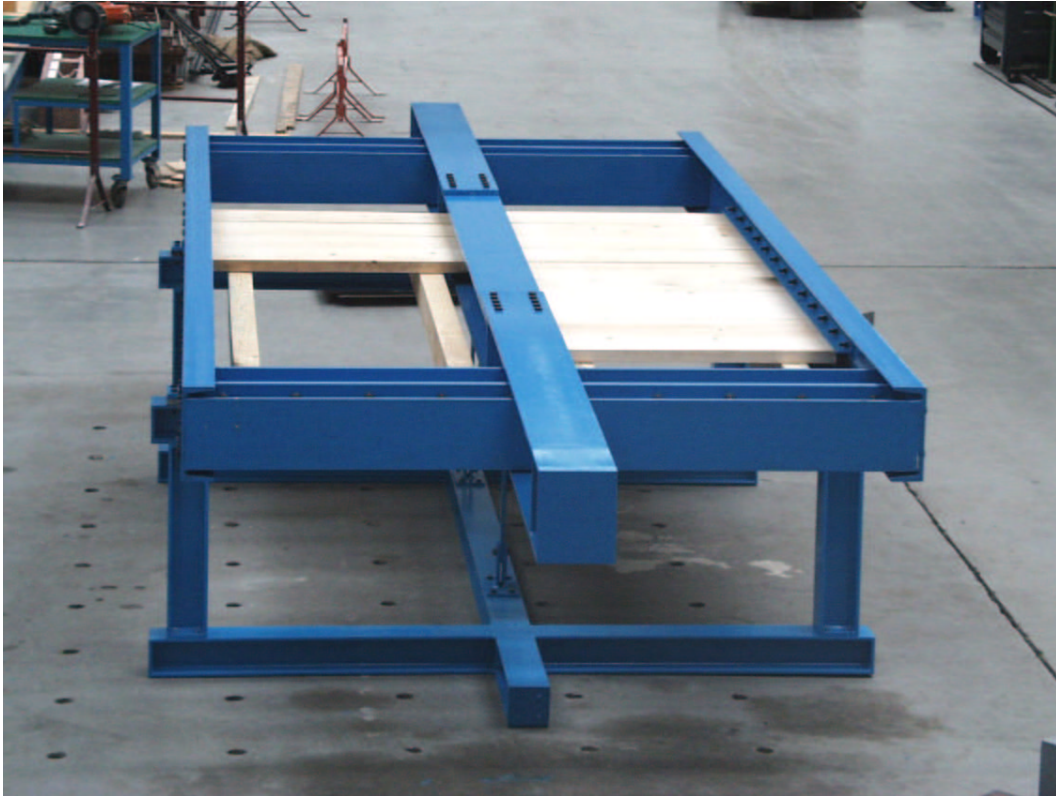
Fig. 2. Giunto chiodato tra le lamiere (a) e giunto saldato tra le lamiere e i correnti longitudinali (b).

I due provini si differenziano nella posizione dei giunti di unione e nel passo delle viti di fissaggio delle lamiere all'assito. Il primo provino ha un giunto longitudinale a distanza di 40 cm dal bordo esterno ed un giunto trasversale ad una distanza di 50 cm dal bordo di testata (Fig.2a). Il secondo provino ha due giunti di unione longitudinali in prossimità dei correnti oltre al giunto trasversale sempre a distanza di 50 cm dalla testata (Fig. 2b). Le unioni dei due provini con il corrente centrale ed i due correnti laterali sono realizzate con saldature in modo da limitare gli scorrimenti (Fig. 2b).

Il banco di prova in acciaio consente di provare contemporaneamente due provini ("1" in Fig. 4), disposti a fianco di un corrente centrale (2) sul quale agiscono i carichi trasmessi da due martinetti (3). Due correnti laterali (6) e due traverse (5) costituiscono il sistema di contrasto.

Il corrente centrale (2) è collegato a due flange (4) che possono scorrere rispetto alle traverse (Figg. 4 e 5). Disponendo i martinetti (3) negli alloggiamenti tra le flange e le traverse è possibile applicare al corrente centrale dei carichi alternati. I due martinetti idraulici da 600 kN sono posizionati ad entrambe le estremità del corrente centrale per limitare le deforma-

zioni longitudinali del corrente. I correnti hanno inoltre rigidità tale da consentire la distribuzione uniforme del carico lungo i bordi dei pannelli e quindi realizzano uno stato di sforzo simile a quello reale indotto in un impalcato dall'azione sismica. Per semplicità operativa i due pannelli di lamiera sono vincolati ai soli correnti longitudinali (centrale e laterali).



(a)



(b)

Fig. 3. Banco con solaio in legno parzialmente montato (a) e con la lamiera applicata sull'assito (b).

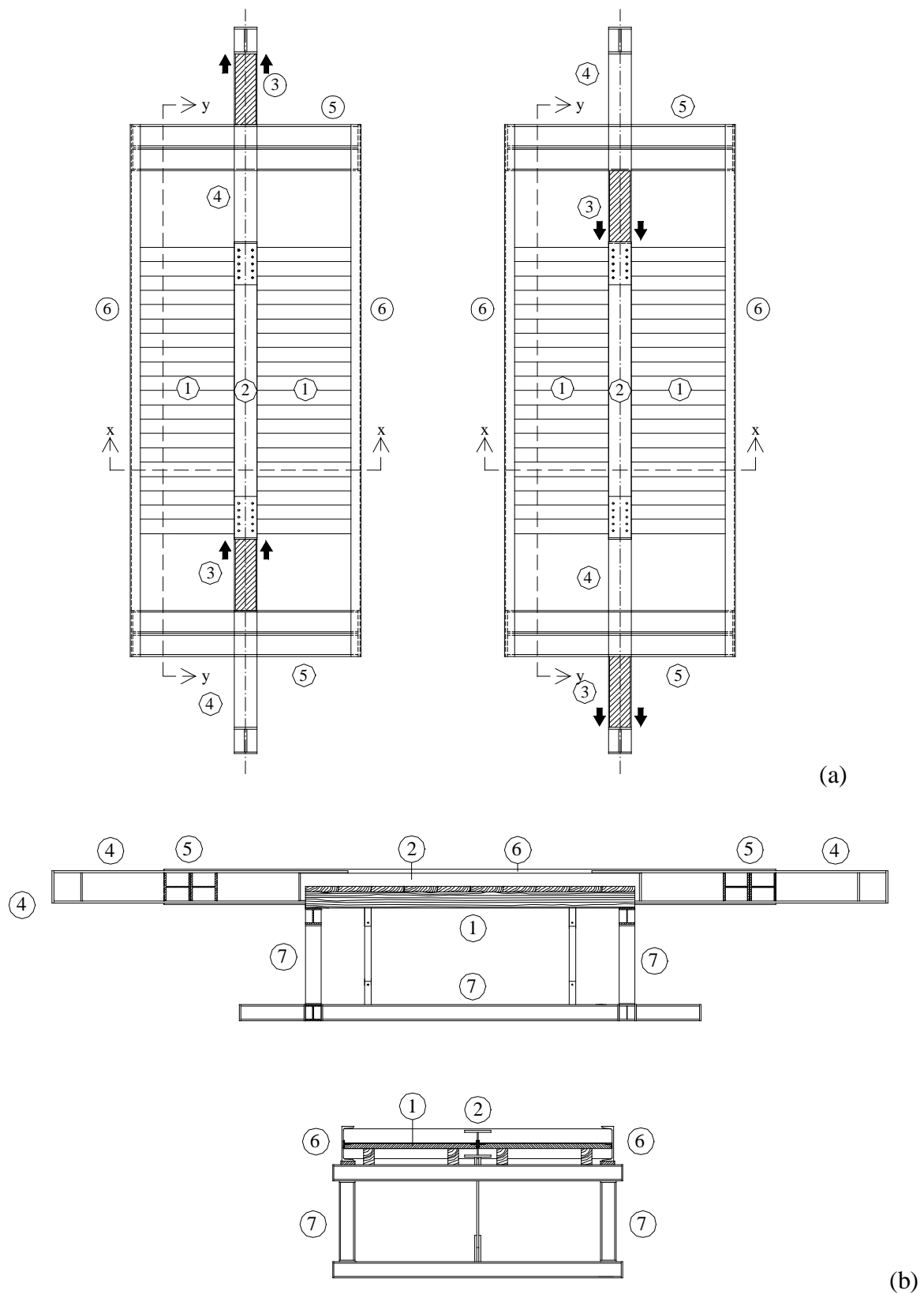


Fig. 4. Pianta (a), sezione longitudinale e sezione trasversale (b) del provino nel banco di prova.

Il sistema di forze trasmesse dal corrente centrale (2) al sistema di contrasto ad anello costituito dalle traverse (5) e dai correnti laterali (6) è autoequilibrato. Il basamento di sostegno, realizzato da due appoggi per i correnti laterali e da due bielle per il corrente centrale, è completamente isolato dal sistema di applicazione del carico. In questo modo il corrente centrale è appoggiato a due bielle e, sotto l'azione di martinetti, può traslare rispetto ai correnti laterali.

I due martinetti in serie applicano (ognuno) sul corrente centrale e sui contrasti una forza pari ad F mentre sui correnti laterali, per equilibrio, si generano reazioni pari ad $F/2$ (Fig. 5). Il campione di solaio è quindi sollecitato da due forze uguali e contrarie, parallele ai bordi longitudinali, che generano sollecitazioni di taglio.

Si deve osservare che la mancanza di elementi di irrigidimento sulle testate dei provini, in realtà non consente la formazione di flussi di taglio alle estremità della lamiera che invece si manifestano nel solaio reale; questo crea zone di disturbo in prossimità delle testate. L'estensione di tali zone è stata studiata con una analisi elastica agli elementi finiti. La Figura 6a mostra la discretizzazione del modello sperimentale con elementi finiti mentre la Figura 6b mostra la distribuzione degli sforzi tangenziali nella lamiera. La Figura 6c evidenzia infine l'andamento degli sforzi tangenziali ottenuti numericamente lungo tre sezioni longitudinali del provino, rispettivamente a distanza di 50, 75 e 90 cm dal corrente laterale. Si può notare che la distribuzione degli sforzi tangenziali in prossimità del corrente centrale ($x=90$ cm) è quasi costante fino alle estremità. La distribuzione lungo la sezione nella mezzeria ($x=50$) può invece essere considerata uniforme solo in un tratto centrale, lungo circa 180 cm (Fig. 6c). Per questa ragione, per determinare l'intensità degli sforzi tangenziali ipotizzati costanti lungo la lamiera costanti, occorre dividere il carico per la lunghezza ideale ridotta (180 cm) determinata numericamente.

Le viti di contenimento, necessarie per evitare l'instabilità della lamiera, sono state applicate ad un passo diverso per i due provini. In particolare, nel provino con un solo giunto longitudinale le viti sono state applicate ad un passo di 200 mm. Il carico critico è stato stimato teoricamente con l'ipotesi semplificativa di pannelli di lunghezza pari al provino (2500 mm), larghezza pari al passo delle viti (200 mm) e vincoli di appoggio sui bordi (Fig. 7), ed è risultato pari a circa 4 volte il carico di esercizio. Nel secondo provino le viti sono state applicate ad un passo di 350 mm a cui corrisponde un carico critico nominale poco superiore al carico di esercizio utilizzato per il solaio. La Tabella 1 riporta i valori del carico critico determinato per i due provini con la teoria classica (Timoshenko e Gere, 1961).

Nome provino	Passo viti [mm]	$F_{\text{esercizio}}$ [kN]	$F'_{\text{crit.}}$ (teorica) [kN]	$F''_{\text{crit.}}$ (sperimentale) [kN]	$F''_{\text{crit.}}/F'_{\text{crit.}}$	$\tau_{\text{crit.}}$ Teorica [MPa]
Provino 20	200	120	455.6	240	0.527	101.3
Provino 35	350	120	148.8	75	0.504	33.1

Tab. 1 – Carico e tensioni critiche teoriche.

Per facilitare l'applicazione delle viti sono state utilizzate lamiere forate con fori di 5 mm di diametro disposti secondo una maglia quadrata con passo di 50x50 mm (Fig. 2).

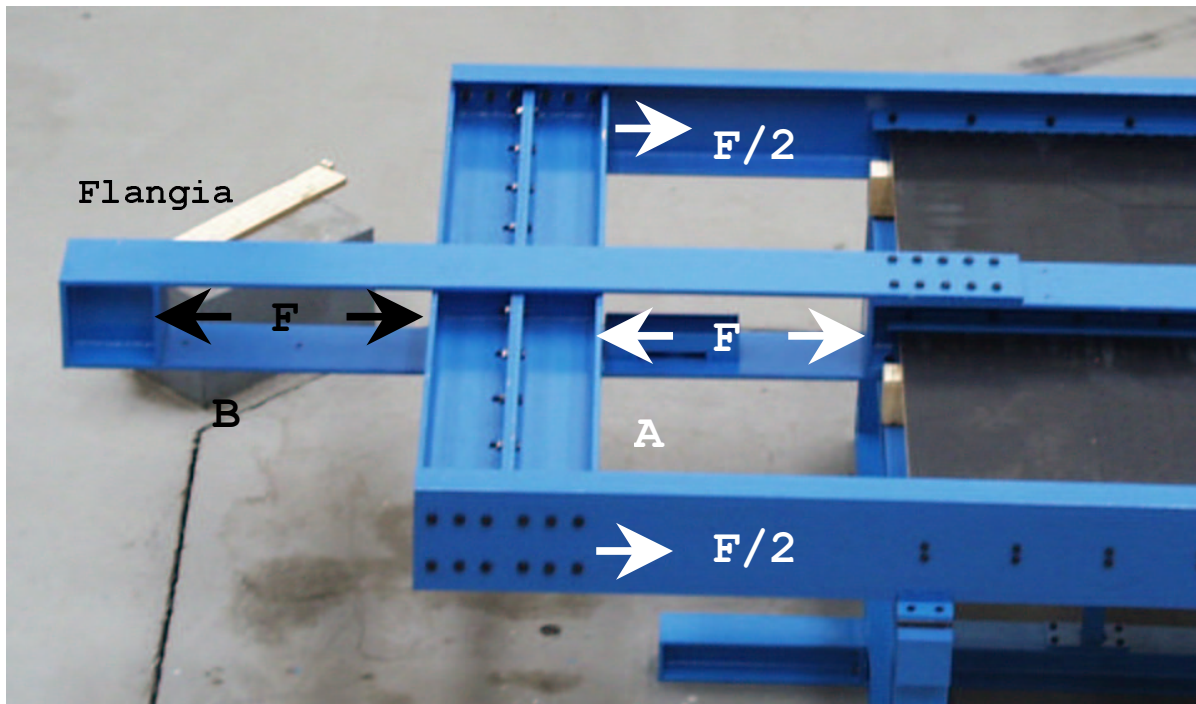


Fig. 5. Particolare delle flange e delle traverse per il contrasto del carico applicato dai martinetti idraulici che possono essere posizionati nei due alloggiamenti per applicare il carico nelle due direzioni (A o B).

3 STRUMENTAZIONE E MODALITÀ DI CARICO

La strumentazione è stata predisposta per misurare principalmente le deformazioni a taglio dei giunti e della lamiera e l'insorgere degli imbozzamenti.

Per la misura del carico applicato ai provini sono state posizionate due celle di carico tra i martinetti e le traverse di contrasto.

Per il rilievo degli spostamenti relativi tra il corrente centrale ed i due correnti laterali sono state predisposte tre aste metalliche ortogonali all'asse del banco, solidali al corrente centrale (Figg. 8 e 9). Gli spostamenti sono stati determinati in tre punti dei correnti longitudinali, a distanza di 40 cm, 125 cm e 210 cm dalla testata, applicando su ciascun corrente laterale 3 trasduttori di spostamento induttivi (LVDT).

Le deformazioni angolari nelle lamiere sono state misurate utilizzando 2 coppie di estensimetri elettrici per ogni provino, disposti a 45° rispetto alla direzione di applicazione del carico, che forniscono gli sforzi principali nell'ipotesi di taglio puro e di comportamento elastico.

In corrispondenza di tutti i giunti sono stati applicati trasduttori di spostamento induttivi o comparatori millesimali meccanici, con i quali sono stati rilevati gli scorrimenti tra le lamiere e tra le lamiere ed i correnti (Fig. 8).

L'innalzamento delle lamiere durante l'eventuale imbozzamento è stato rilevato con due gruppi di comparatori millesimali e centesimali che consentono di valutare lo spostamento relativo tra legno e lamiera.

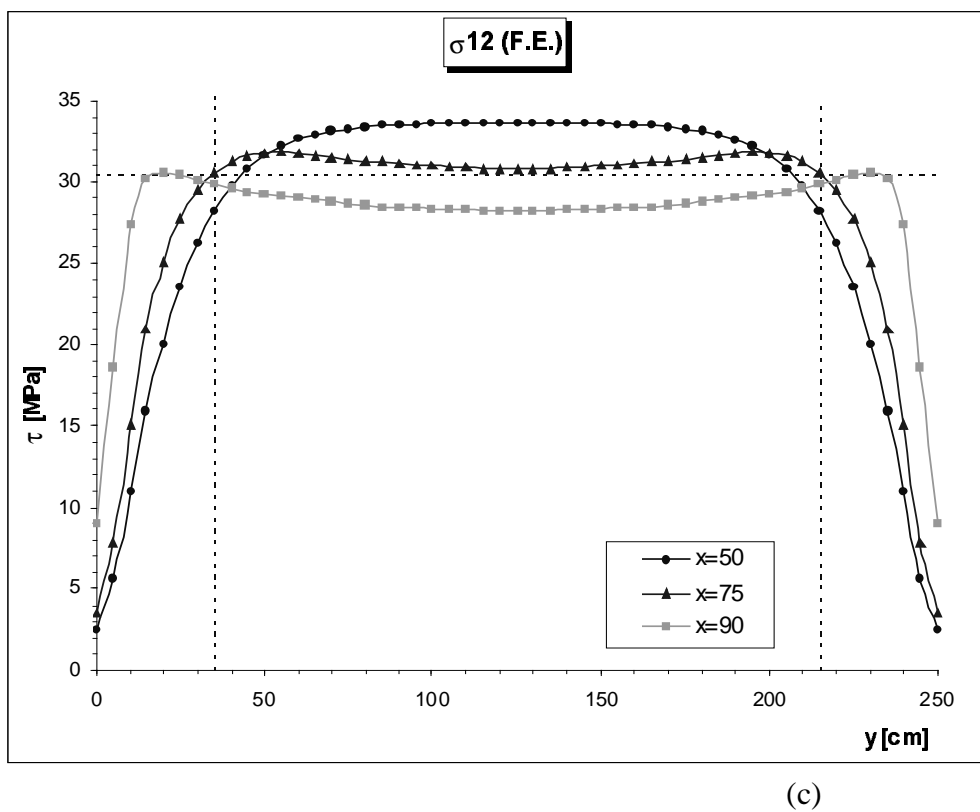
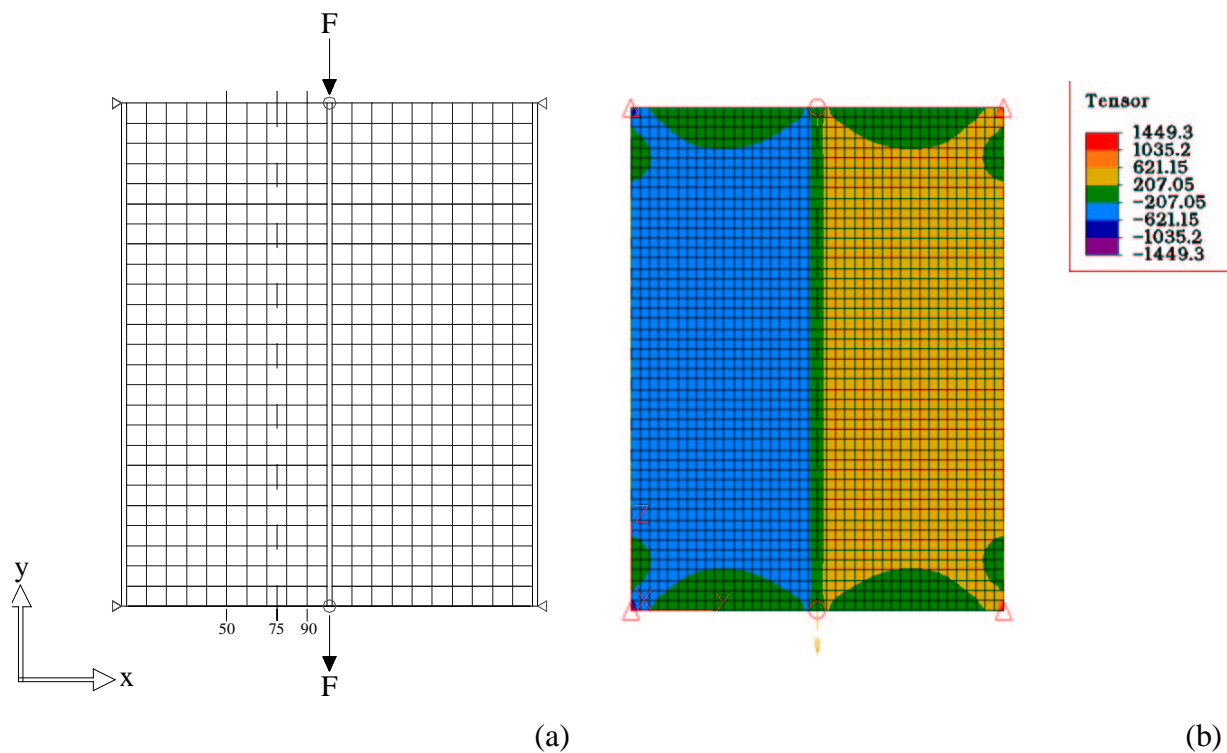


Fig. 6. Discretizzazione del modello sperimentali con elementi finiti (a); distribuzione degli sforzi tangenziali nella lamiera (b) ed in alcune sezioni longitudinali (c) ottenute con una analisi elastica.

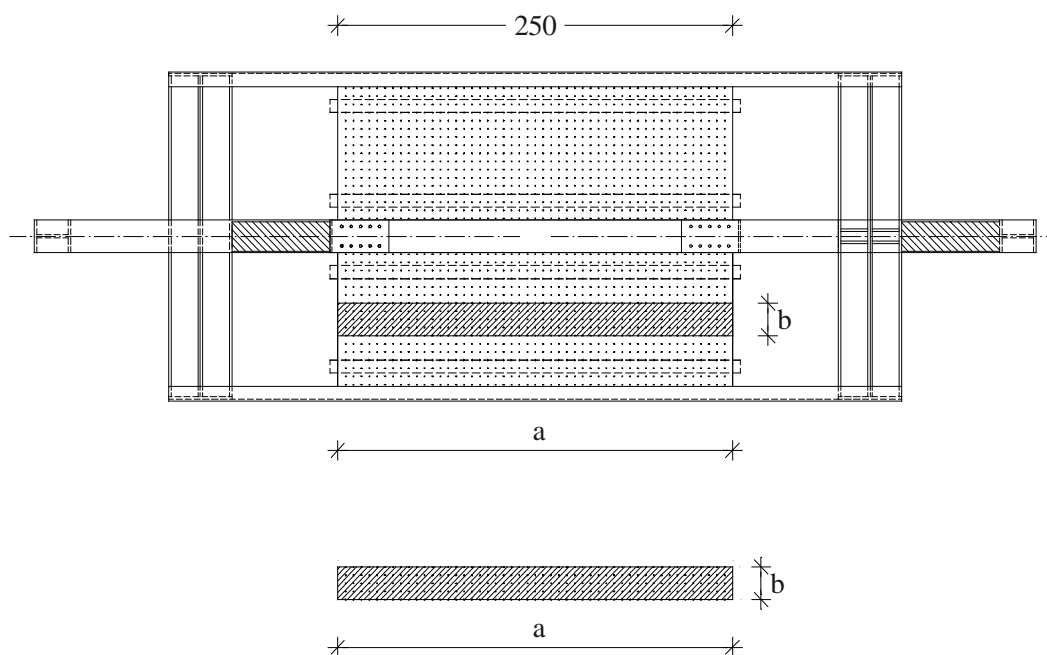


Fig. 7. Pianta del banco sperimentale con individuazione dello schema di calcolo utilizzato per verificare la stabilità della lamiera.

Oltre allo scorrimento longitudinale complessivo dei correnti (s_{tot}) si sono misurati gli scorrimenti tra lamiere ed i correnti (s' , strumenti M,N,P,Q in Fig. 8) e gli scorrimenti nei giunti longitudinali delle lamiere (s'' , strumenti C,F,F2 in Fig. 8).

I trasduttori induttivi e gli estensimetri elettrici sono collegati ad una centralina di acquisizione a sua volta collegata ad un calcolatore per la memorizzazione dei dati. Con tale sistema di acquisizione sono state effettuate misurazioni in continuo con una frequenza di una lettura al secondo. Sui comparatori meccanici sono state effettuate letture periodiche ad intervalli di carico prestabiliti, scelti di volta in volta in funzione del carico ultimo applicato. Le Figure 8 e 9 mostrano la posizione dei diversi strumenti di misura descritti in precedenza.

L'azione sismica di esercizio, utilizzata nella sperimentazione, corrisponde all'azione statica equivalente prevista per il Palazzo della Loggia; essa da origine ad un flusso di sforzi tangenziali nella lamiera pari a 46.5 kN/m che corrisponde ad una forza (F) sul singolo provino pari a circa 120 kN.

La prova è stata articolata nelle seguenti fasi di carico:

- Fase 1: carico di 60 kN (su ogni provino), pari alla metà del carico di esercizio;
- Fase 2: carico di 120 kN, pari a quello di esercizio;
- Fase 3: carico di 180 kN, pari a 1.5 volte il carico di esercizio (carico ultimo nominale);
- Fase 4: carico di 240 kN, pari a due volte il carico di esercizio;
- Fase 5: carico ultimo, raggiunto il quale il provino è stato scaricato ma non si è proceduto all'inversione del carico per l'eccessiva deformazione della lamiera;
- Fase 6: è stata effettuata una serie ulteriore di cicli a 120 kN (carico di esercizio) e a 180 kN (carico ultimo convenzionale) per verificare la resistenza residua della lamiera dopo il raggiungimento del carico ultimo.

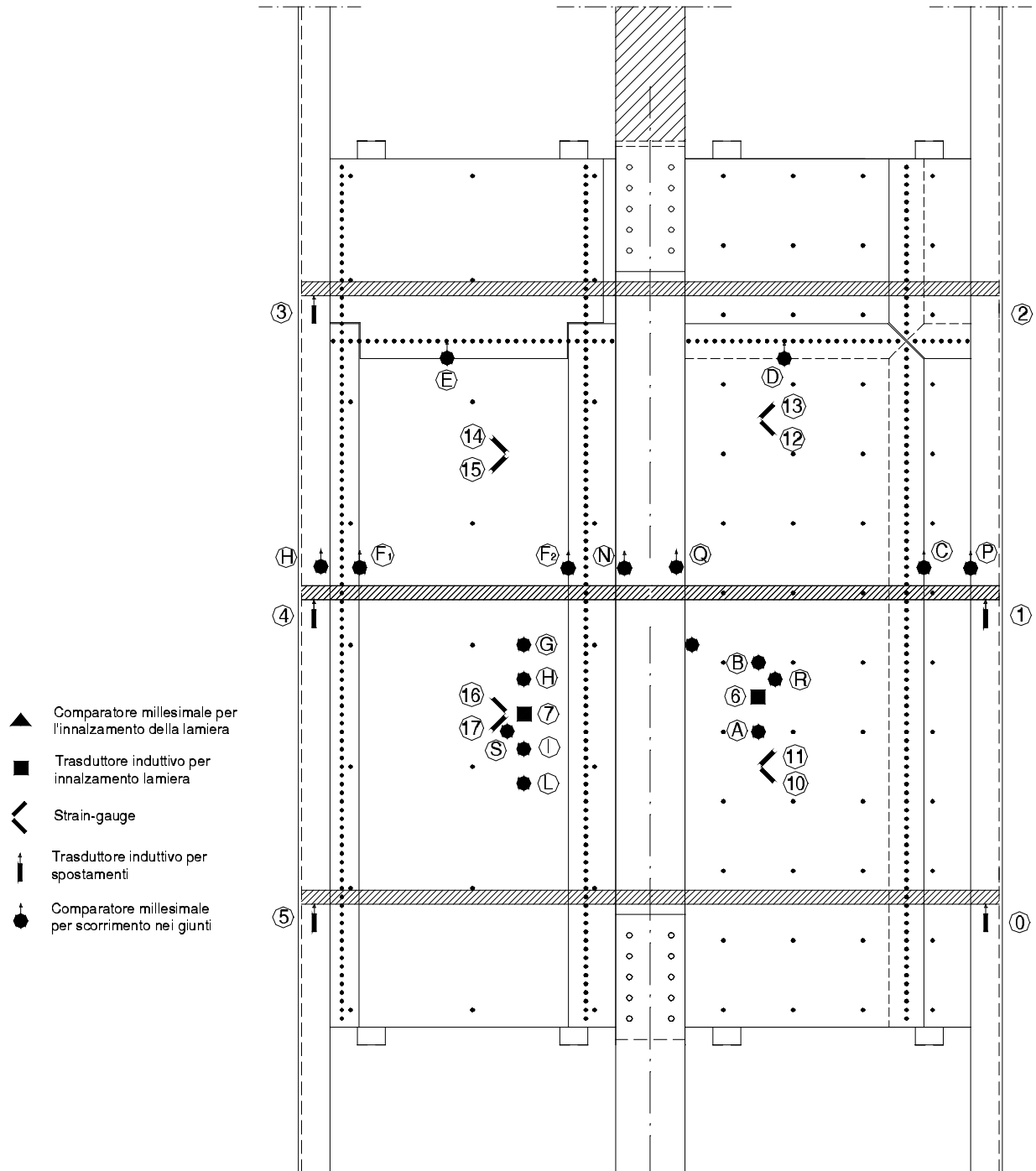


Fig. 8. Pianta del banco di prova con gli strumenti di misura utilizzati nella prova sperimentale.

- Ogni fase di carico è stata organizzata seguendo le medesime procedure:
- il carico massimo è stato applicato in entrambe le direzioni.
 - Per ogni direzione di carico sono stati realizzati più cicli di carico e scarico.

- Il numero dei cicli di carico è stato stabilito in funzione dell'incremento delle deformazioni. I cicli si sono susseguiti finché, a parità di carico applicato, l'incremento di spostamento Δs (del singolo ciclo) è risultato inferiore al 5% di quello rilevato nel ciclo precedente.
- Il carico massimo previsto è stato raggiunto tramite singoli incrementi di carico pari a 5 kN per la fase 1; 10 kN per la fase 2 e 20 kN per le fasi successive.
- La velocità di prova è stata regolata in funzione della velocità di deformazione letta attraverso gli strumenti di misura. Raggiunto un livello di carico prestabilito è stato diagrammato l'andamento delle deformazioni, a carico costante, in modo tale da applicare l'incremento successivo quando la velocità di spostamento era scesa al 10% del valore iniziale.

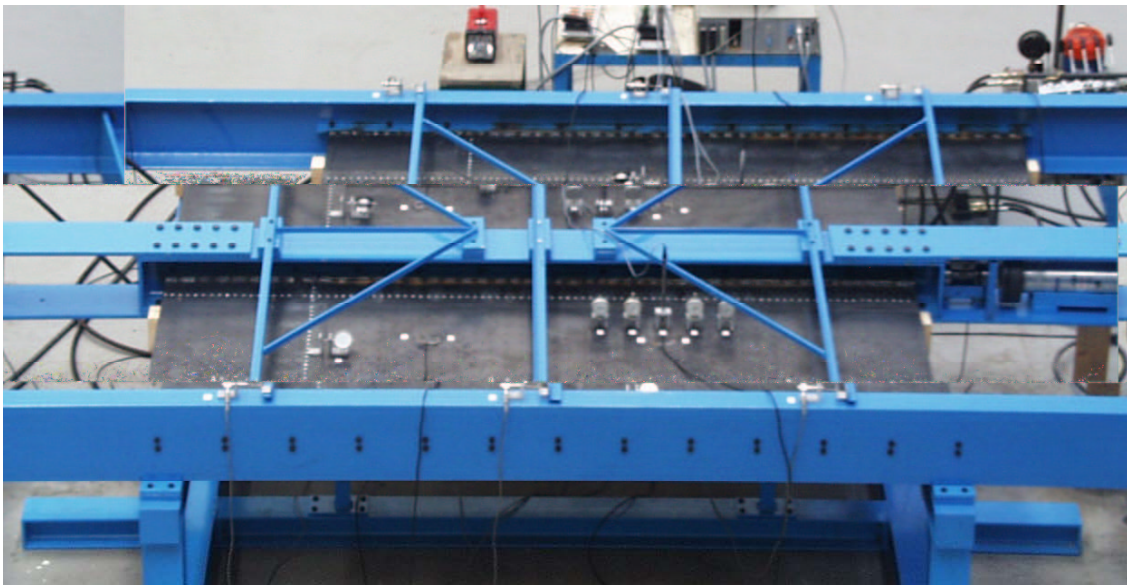


Fig. 9. Banco di prova con gli strumenti di misura applicati.

4 RISULTATI SPERIMENTALI

I principali risultati sperimentali riguardano le relazioni tra il carico e lo spostamento relativo tra i due lati esterni del provino, lo scorrimento tra i giunti delle lamiere, le deformazioni ed il sollevamento delle lamiere. In particolare, lo spostamento è riportato nei seguenti tre modi diversi:

- scorrimento globale (s_{tot}), rilevato direttamente dai trasduttori di spostamento 0,1,2,3,4 e 5 (Fig. 8);
- scorrimento depurato dai soli scorrimenti tra la lamiera ed i correnti (s), rappresentativo di una situazione reale nella quale si possono verificare gli scorrimenti tra i giunti interni tra le lamiere;
- spostamento delle sole lamiere (s_{net}), quindi depurato anche dagli scorrimenti tra i giunti interni tra le lamiere, per il facilitare i confronti con le analisi numeriche nelle quali non erano stati considerati i giunti con i conseguenti scorrimenti anelastici.

La Figura 10 mostra il diagramma del carico (F) su ognuno dei due provini in funzione dello spostamento netto (s_{net}), riportato come media dei due provini per tutti i cicli di carico

applicati. Nella stessa figura è anche riportata la retta relativa al calcolo agli elementi finiti, determinata considerando uno spessore equivalente di 1.7 mm per tenere conto della presenza dei fori. Tale spessore è stato determinato confrontando la deformabilità a taglio locale determinata sperimentalmente con i valori ottenuti dalla teoria classica. Si può osservare il buon accordo tra la rigidezza numerica e la rigidezza sperimentale nella fase iniziale della prova, fino ad un carico di 40 kN, al di sotto del quale il provino mostra un comportamento prevalentemente elastico (Fig. 10).

In realtà il comportamento dei due provini è stato sensibilmente diverso uno dall'altro in quanto nel provino con viti di collegamento all'assito con passo di 350 mm (nel seguito chiamato anche "Provino 35"), è risultato notevolmente più deformabile del provino con viti a passo di 200 mm ("Provino 20"), a causa della sopraggiunta instabilità della lamiera. Per evidenziare meglio questo aspetto, la Figura 11 mostra il diagramma carico spostamento (s_{net}) rilevato separatamente sui due provini nel ciclo relativo al carico di rottura nominale, convenzionalmente assunto pari a 1.5 volte il carico di esercizio. Si noti il buon accordo tra la rigidezza numerica e sperimentale nel provino con viti a passo di 200 mm (Fig. 11a) e la minor rigidezza sperimentale del provino con viti a passo di 350 mm (Fig. 11b) nel quale si è verificata l'instabilità della lamiera per un carico pari a circa i due terzi del carico di esercizio (75 kN); tale carico è risultato pari a circa la metà di quello previsto con l'analisi semplificata. Viceversa, nel provino con viti a passo di 200 mm l'instabilità si è verificata con un carico di circa 240 kN, valore che è pari a circa il doppio del carico di esercizio ma ancora pari a circa la metà del valore previsto con l'analisi approssimata (Tab. 1).

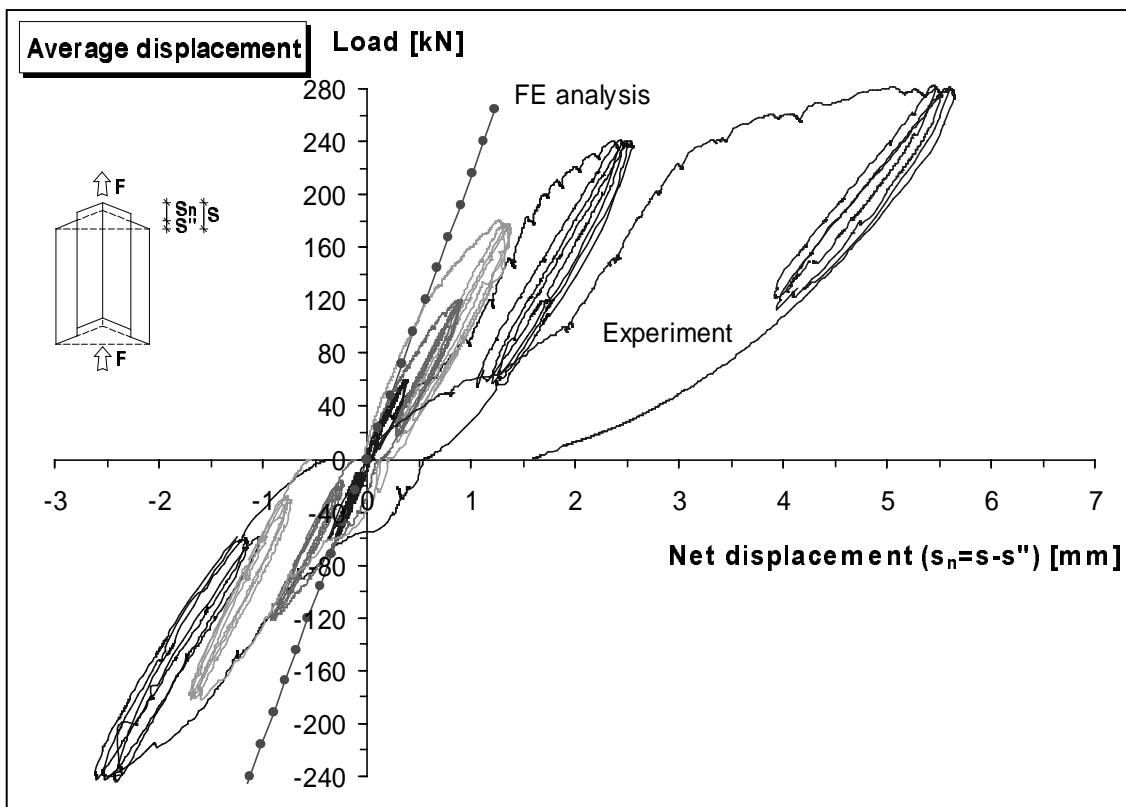
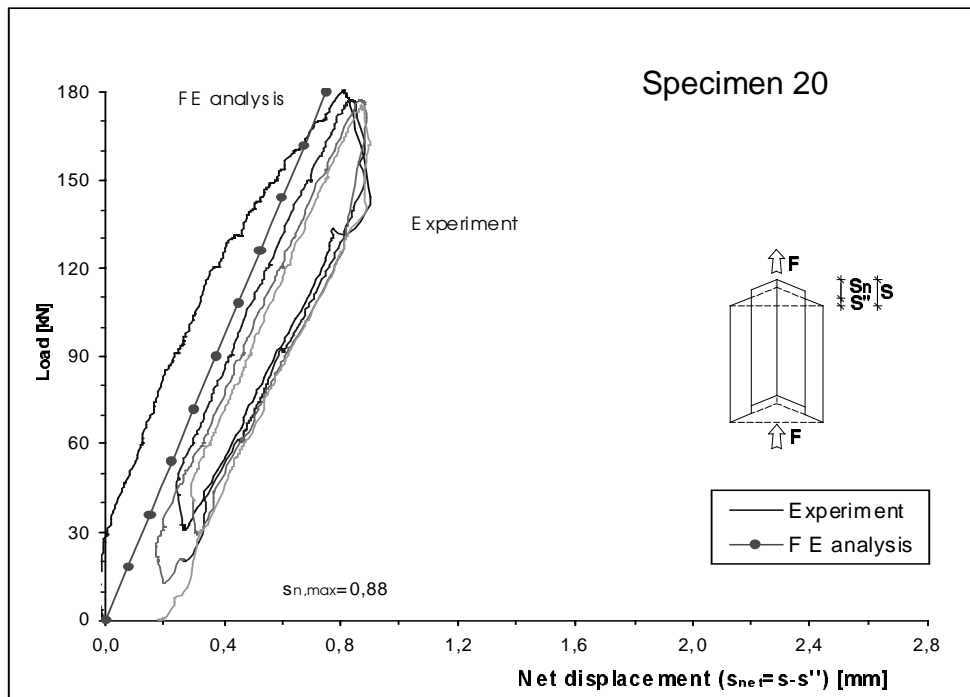
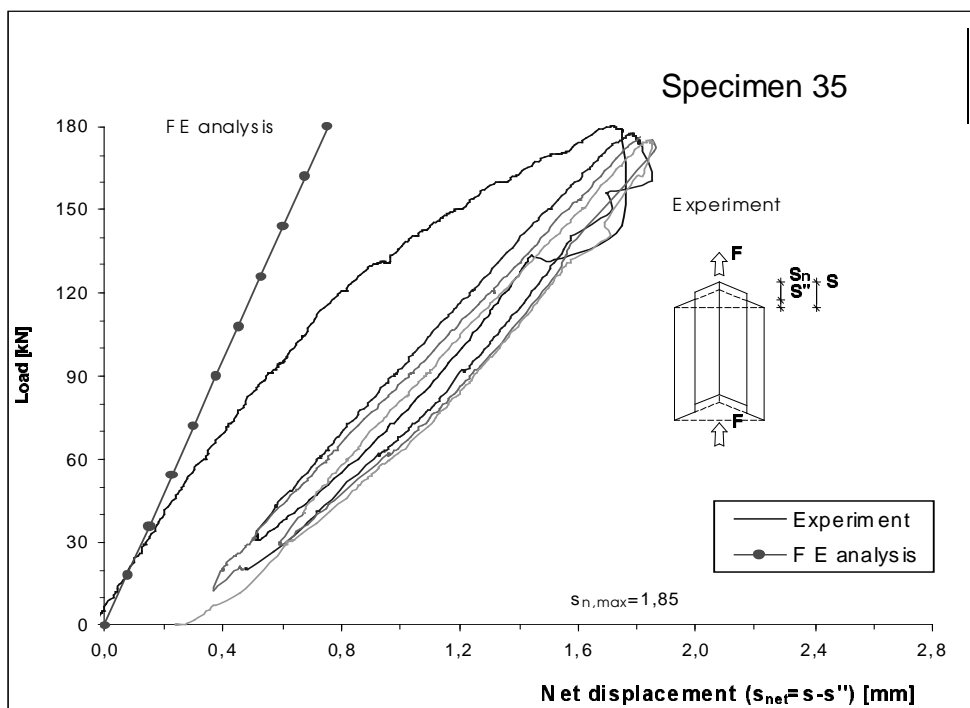


Fig. 10. Diagramma del carico in funzione dello spostamento netto, riportato come media dei due provini per tutti i cicli di carico.



(a)



(b)

Fig. 11. Diagramma del carico in funzione dello spostamento netto rilevato nel "Provino 20" (a) e nel "Provino 35" (b) nel ciclo di carico che prevedeva di raggiungere il carico ultimo nominale.

L'imbozzamento della lamiera è evidenziato dai grafici relativi alle deformazioni rilevate sperimentalmente sulla lamiera con estensimetri elettrici disposti a 45° rispetto ai correnti longitudinali (Fig. 8). La Figura 12 mostra che lo sforzo tangenziale, determinato per il "Provino

35” dalla deformazione rilevata dall’estensimetro nell’ipotesi di comportamento elastico, è proporzionale al carico fittanto che quest’ultimo rimane inferiore a 75 MPa, oltre il quale l’estensimetro misura deformazioni maggiori causate dall’imbozzamento della lamiera.

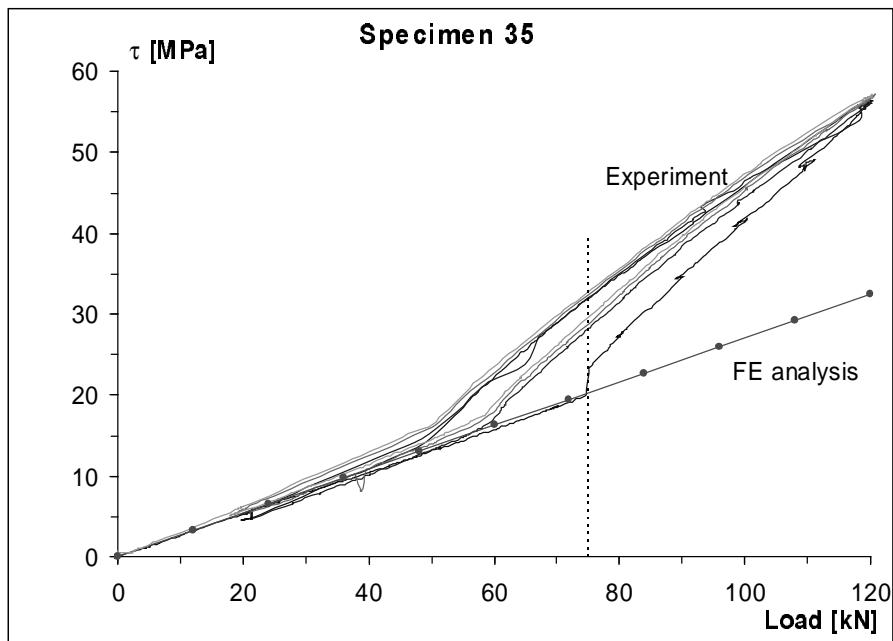


Fig. 12. Diagramma dello sforzo tangenziale nella lamiera ricavato dagli estensimetri elettrici nell’ipotesi di comportamento elastico, in funzione del carico applicato al “Provino 35”.

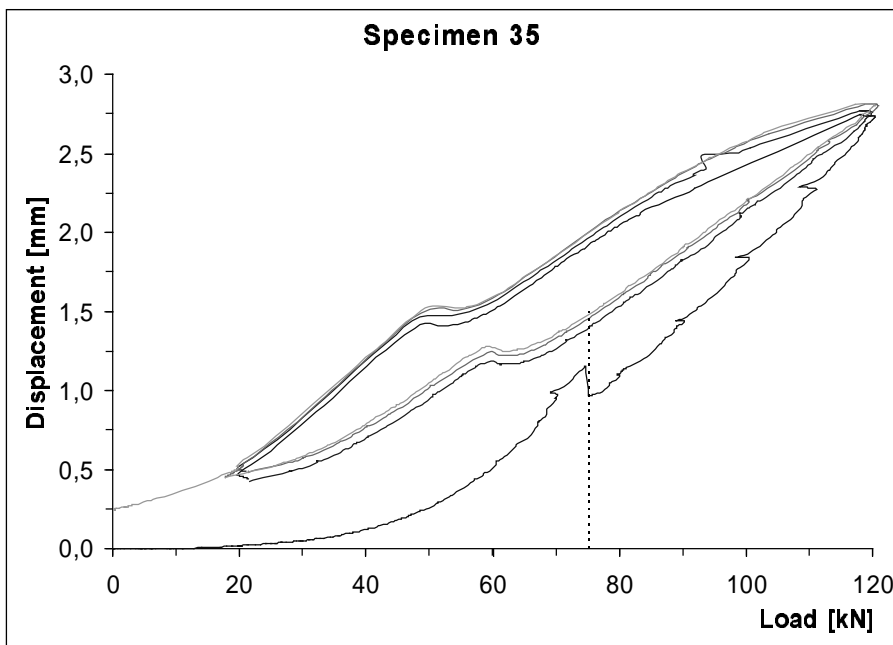


Fig. 13. Diagramma sperimentale dello spostamento verticale locale della lamiera in funzione del carico applicato al provino con viti a passo di 350 mm.

Il fenomeno dell’instabilità è evidenziato anche dal diagramma dell’innalzamento della lamiera in funzione del carico in uno dei punti rilevati sperimentalmente nel “Provino 35”, ri-

portato in Figura 13. La Figura 14 mostra un particolare della lamiera imbozzata a fine prova.

Una volta raggiunto il carico ultimo sono stati eseguiti ulteriori cicli di carico e scarico (fino al carico di esercizio) che hanno evidenziato una riduzione della rigidità del solaio pari a circa il 30% rispetto alle precedenti fasi di carico (Fig. 10).

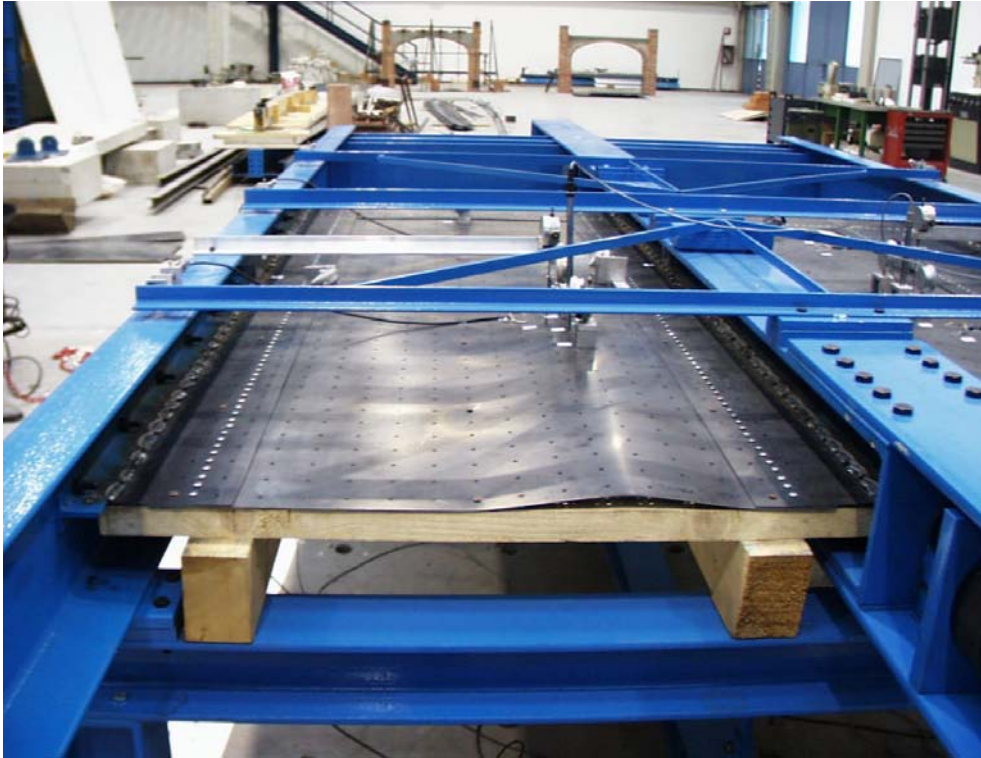


Fig. 14. Particolare dell'imbozzamento della lamiera nel provino con viti a passo di 350 mm a fine prova.

Al fine di valutare la resistenza residua dopo il raggiungimento del carico ultimo, il solaio è stato scaricato completamente e sono state successivamente applicate due ulteriori fasi di carico: nella prima si è raggiunto il carico d'esercizio mentre nella seconda si è raggiunto il carico ultimo nominale. La Figura 15 mostra la buona rigidità residua del solaio che è in grado di resistere ad ulteriori sollecitazioni.

L'efficacia della tecnica di consolidamento proposta dipende molto dal comportamento dei giunti tra le lamiere. Le rilevazioni effettuate durante le prove in corrispondenza dei giunti del provino hanno consentito di studiare il comportamento delle connessioni tra le lamiere sotto carico. Le analisi condotte su diversi tipi di collegamento hanno mostrato un buon comportamento dei giunti sui quali sono stati rilevati scorrimenti contenuti che non compromettono gli effetti del consolidamento. Infatti, l'incidenza degli scorrimenti tra i giunti è risultata pari a circa il 7% dello scorrimento totale in corrispondenza del carico d'esercizio ed ha raggiunto il valore massimo del 10% per un carico doppio a quello d'esercizio. Ad un ulteriore aumento del carico gli scorrimenti dei giunti influiscono in percentuale minore a causa dell'imbozzamento della lamiera.

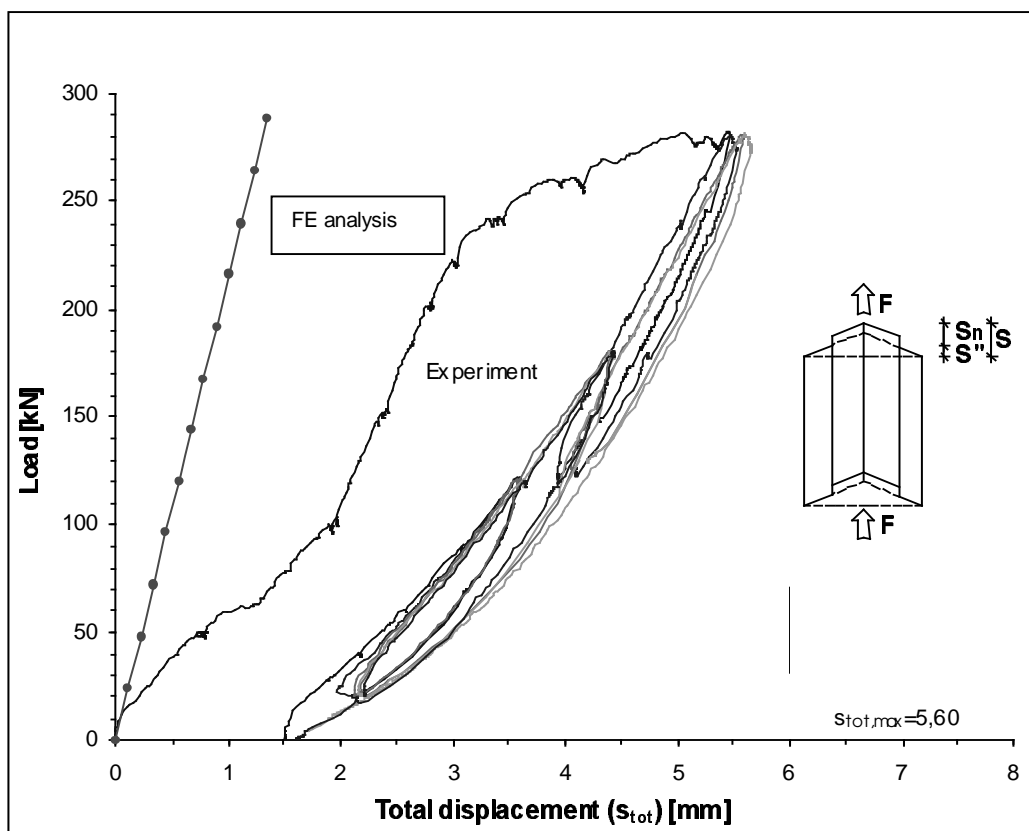


Fig. 15. Diagramma del carico in funzione dello spostamento medio netto nei cicli di carico applicati successivamente al raggiungimento del carico ultimo.

5 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nel presente lavoro si è studiato sperimentalmente il comportamento di un solaio rinforzato con una lamiera metallica, sottoposto a sollecitazioni di taglio che simulano quelle sismiche, utilizzando un banco opportunamente progettato e realizzato per questo studio.

La tecnica di consolidamento proposta si è rivelata molto efficace ed i risultati ottenuti sono stati confrontati con i risultati di analisi numeriche e della teoria classica. La sottile lamiera in acciaio (con spessore di 2 mm) ha conferito al solaio in legno una considerevole rigidità nel piano e una buona resistenza.

Il banco di prova realizzato ha consentito di effettuare le prove sperimentali contemporaneamente su due provini, diversi per il passo delle viti di contenimento che collegano la lamiera all'assito sottostante per evitare l'instabilità della lamiera stessa.

I diagrammi sperimentali mostrano che il "Provino 20", con viti di collegamento all'assito ad un passo di 200 mm (pari a 100 volte lo spessore della lamiera), ha mantenuto una buona rigidità fino ad una sollecitazione pari a due volte il carico sismico previsto. Oltre tale limite si osserva chiaramente un calo della rigidità e nei diagrammi a piccoli incrementi di carico corrispondono notevoli deformazioni.

I diagrammi carico-spostamento mostrano un comportamento iniziale quasi lineare. Raggiunto il carico di collasso sperimentale e scaricato il provino, si sono eseguiti ulteriori cicli di carico che hanno messo in evidenza una buona resistenza residua ed una perdita di rigidità modesta. Infatti, dopo lo scarico si manifesta una ripresa elastica significativa che restituisce al

solaio una rigidezza simile a quella iniziale risultando la riduzione minore del 30%.

I risultati sperimentali forniscono indicazioni che possono essere utilizzate per la progettazione di una struttura reale. Confrontando i risultati sperimentali con quelli teorici, relativi all'instabilità delle lastre sottili, si sono ottenute le prime informazioni sulla possibilità di utilizzare le relazioni proposte dalla teoria classica.

Le prove e le verifiche effettuate su diversi tipi di collegamento hanno mostrato un buon comportamento dei giunti che hanno subito scorrimenti contenuti.

In conclusione, i risultati raggiunti mostrano che la tecnica di consolidamento proposta rappresenta una soluzione efficace ed innovativa, particolarmente adatta per gli interventi di miglioramento sismico di strutture monumentali.

BIBLIOGRAFIA

Del Piccolo, M., Giuriani, E. e Marchina, E. (1993), "*Resistenza a taglio di connessioni so-laioparete*", Technical Report, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Brescia.

Felicetti, R., Gattesco, N. e Giuriani, E. (1992), "*Indagine teorica e sperimentale sui pioli per connessioni soletta-muratura*", Technical Report, Istituto di Meccanica Teorica Applicata, Università di Udine.

Gelfi, P. e Giuriani, E. (2000), "*Studio sperimentale del comportamento di travi miste legno-acciaio con connettori a piolo*", V Workshop Italiano sulle Costruzioni Composte - Palermo, in corso di pubblicazione.

Gelfi, P., Giuriani, E. e Marini, A. (2001), "*Stud Shear Connection Design for Composite Concrete Slab and Wood Beams*", ASCE Journal of Structural Engineering, sottoposto per pubblicazione.

Giuriani, E. (1997), "*Recupero e consolidamento delle strutture*", in "Percorsi del restauro in San Faustino a Brescia", Ed. G. Mezzanotte, Il Polifilo, pp.153-180.

Giuriani, E. e Frangipane, A. (1993), "*Wood-to-concrete composite section for stiffening of ancient wooden beam floors*", I Workshop Italiano sulle Costruzioni Composte - Trento, pp. 307-317.

Giuriani, E., Marchina, E. e Veroli, M (1998) "*Comportamento sotto carico ciclico di solai in legno rinforzati con soletta in c.a. per l'adeguamento sismico*", Technical Report, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Brescia.

Giuriani, E., Plizzari, G.A. e Bassini, C. (1999), "*Experimental results on masonry wall anchored ties*", in STREMAH99, Dresda (Germania), Giugno 1999, pp. 55-64.

Modena, C., Tempesta, F. e Tempesta, P. (1997), "*Una tecnica a secco*", L'Edilizia, n° 11/12.

Piazza, M. e Turrini, G. (1983), "*Una tecnica di recupero statico dei solai in legno*", Recuperare, 5,6,7.

Ronca, P., Gelfi, P. e Giuriani, E. (1991), "*The behaviour of a wood-concrete composite beam under cyclic and long term load*", in STREMAH91, Seville (Spagna), Vol. 1, pp. 263-275.

Timoshenko, S.P. e Gere, J.M. (1961), "Theory of elastic stability", McGraw-Hill.

RINGRAZIAMENTI

Gli Autori desiderano ringraziare gli Ingegneri Stefano Ballini, Bordanzi Estevan e Frans Giobbi per la preziosa collaborazione nell'esecuzione delle prove sperimentali, effettuate nell'ambito della loro tesi di laurea.