

TRAVI MISTE IN LEGNO E CALCESTRUZZO CON CONNETTORI A PIOLO

Piero Gelfi¹, Ezio Giuriani¹

¹Dipartimento di Ingegneria Civile, Facoltà di Ingegneria, Università di Brescia

ABSTRACT

The reinforcement of wooden floors through a slab of concrete, with a simplified technique of connection, suitable for practice, is studied. As a matter of fact materials, that are normally available in the ordinary restoration work, are used. Tests are conducted on two different composite beams, one with the concrete slab in direct contact with the wood beam, the other with interposed planking. Connectors are ordinary smooth steel bars simply forced into holes, just little smaller in diameter, drilled in the wood beam. Experimental data are provided both for the local shear behaviour of the single connector and for the global flexural behaviour of the composite beams. Results show the effectiveness of the proposed technique on the flexural rigidity and strength of the composite beams. Ultimate load values are in a good agreement with those calculated by classical methods.

1. Presentazione del problema

Gli impalcati in legno dei vecchi edifici manifestano spesso carenze strutturali e funzionali tali da rendere necessari interventi di consolidamento. Essi infatti sono in genere dimensionati per carichi accidentali modesti, ben lontani dai valori richiesti dalle attuali normative, tenendo conto che spesso è richiesto un cambio di destinazione d'uso della struttura. Inoltre, per effetto dei carichi di lunga durata, gli impalcati lignei hanno spesso deformazioni eccessive che ne compromettono la funzionalità. In ogni caso attualmente è richiesta una maggior rigidità, sia per evitare danneggiamenti di pavimenti rigidi e lesioni delle tramezzature, sia per migliorare il comfort abitativo limitando le vibrazioni dovute al calpestio e migliorando l'insonorizzazione. Gli interventi di consolidamento devono poi affrontare il problema della barriera al fuoco tra i piani.

Di particolare importanza è il problema degli edifici storici situati in zona sismica che sono carenti di adeguati incatenamenti che leghino le pareti portanti agli impalcati lignei, incatenamenti che in generale non possono essere realizzati dal modesto ammorsamento delle travi nelle murature. Inoltre gli impalcati in legno non realizzano la funzione di diaframma rigido in grado di trasferire le azioni orizzontali del sisma alle pareti resistenti al taglio.

Nel passato si è fatto ricorso frequentemente alla sostituzione degli impalcati lignei con solai in latero-cemento o in sezione mista in acciaio e calcestruzzo. Una maggiore sensibilità verso la conservazione dell'esistente ha portato alla necessità di consolidare i solai lignei esistenti, con tecniche che usualmente si fondano sulla collaborazione di sottili solette di calcestruzzo armato, solette che nelle zone sismiche vanno adeguatamente ammortate alle murature per realizzare i diaframmi di piano.

La collaborazione tra la soletta di cemento armato e i travetti di legno è realizzata dalla connessione, la cui efficacia caratterizza il comportamento globale dell'impalcato. In anni relativamente recenti sono stati proposti e studiati da vari autori alcuni tipi di connettori che forniscono adeguate caratteristiche meccaniche, ma che richiedono una tecnologia non sempre adatta alla realtà dei cantieri, soprattutto di ristrutturazione ordinaria. Significative sono le connessioni ottenute con spinotti solidarizzati con resina /1/, quelle che utilizzano gang-nails /2,3/, pioli tubolari /4/, indentamenti del calcestruzzo in sedi praticate nel legno /5/.

Nel presente studio sperimentale viene proposta una tecnica di consolidamento adatta ai cantieri ordinari, che fornisce sia il miglioramento della rigidezza flessionale dell'impalcato che l'aumento della sua portata. I risultati riguardano anche il dettaglio del comportamento locale per fornire un riferimento sperimentale ad eventuali indagini teoriche e numeriche. Allo scopo vengono forniti anche i legami del comportamento del singolo connettore necessari per la modellazione teorica.

2. Tecnica di irrigidimento con pioli infissi e prove di taglio

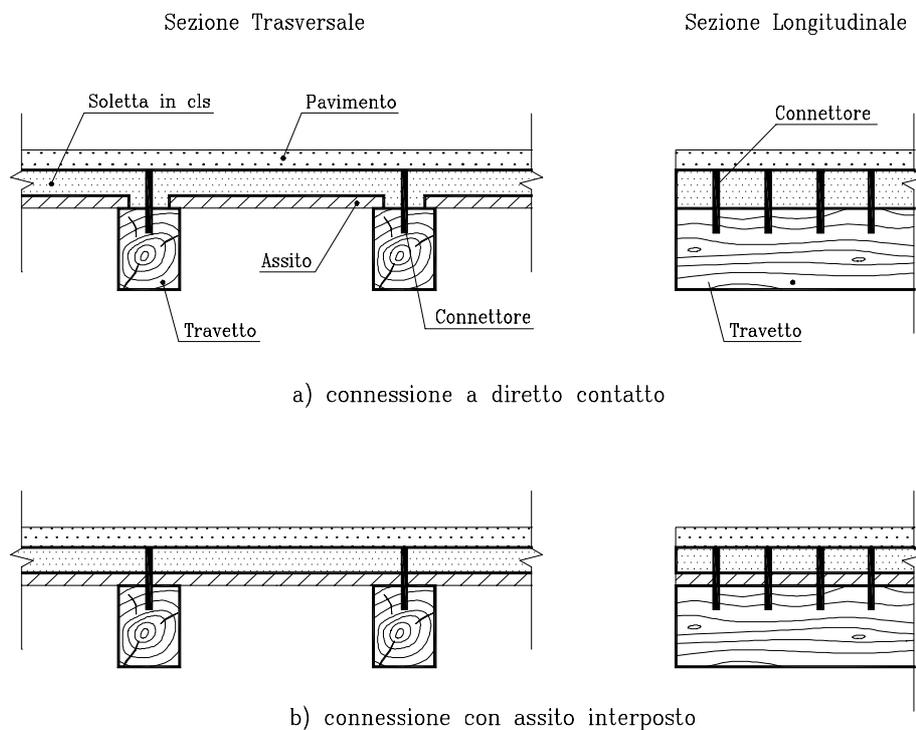


Fig. 1 - Tipologie di connessione oggetto dello studio

La tecnica qui proposta utilizza, come già detto, materiali comuni e facilmente reperibili; i pioli sono infatti ricavati dal taglio di tondini di acciaio liscio comunemente impiegati nelle opere di carpenteria metallica. La messa in opera dei connettori, mediante semplice forzatura a secco, in fori precisi eseguiti nei travetti, non richiede l'intervento di manodopera qualificata; accanto a questa tecnica è proposto anche l'irrigidimento senza ricorrere alla rimozione dell'assito esistente, conservando in tal modo l'aspetto originario dell'intradosso. Ciò, è di notevole importanza se il consolidamento riguarda solai di particolare interesse storico-architettonico.

LEGNO (abete rosso)		
Umidità relativa media ¹	14 %	
Modulo di elasticità ²	95000 daN/cm ²	
Resistenza media a flessione ³	690 daN/cm ²	
Resistenza media a compressione ⁴	402 daN/cm ²	
Resistenza media a rifollamento ⁵	290 daN/cm ²	
CALCESTRUZZO		
Resistenza media cubica R _{cm} ⁶	335 daN/cm ²	
Resistenza media cilindrica f _{cm} ⁶	309 daN/cm ²	
Modulo elastico secante ⁷	310000 daN/cm ²	
ACCIAIO		
	Pioli ϕ 12	Pioli ϕ 16
Tensione di snervamento	3300 daN/cm ²	3550 daN/cm ²
Tensione di rottura	4900 daN/cm ²	4830 daN/cm ²

Tabella I - Caratteristiche dei materiali

Si sono studiati due tipi di connessione. Nel primo la soletta collaborante è a contatto con i travetti ed è quindi necessario asportare parzialmente il tavolato (vedi figura 1a). I connettori a piolo lavorano prevalentemente a taglio e si ottengono rigidità adeguate anche con diametri modesti (pioli ϕ 12 mm di acciaio Fe 430). Nel seguito questa tipologia verrà chiamata connessione a diretto contatto. Nel secondo la soletta collaborante è gettata sopra l'assito (figura 1b). I connettori che attraversano il tavolato sono sollecitati anche a flessione e quindi il loro diametro deve essere maggiore (pioli ϕ 16 mm di acciaio Fe 510) per ottenere una rigidità adeguata. Nel seguito questa tipologia verrà chiamata connessione con assito interposto. Le principali caratteristiche meccaniche dei materiali sono riportate nella tabella I.

I pioli sono tondi lisci e vengono ottenuti mediante taglio a macchina e successiva eliminazione delle sbavature con formazione di invito alla infissione. E' da evitare l'uso della trancia che provoca l'ovalizzazione della sezione terminale del connettore con conseguente allargamento del foro durante l'infissione e la formazione di giochi indesiderati.

¹ Misurata con umidostrato elettronico.

² Media dei valori misurati su 9 campioni prismatici 20x20 mm secondo UNI ISO 3349.

³ Media dei valori misurati su 9 prismatici 20x20 mm secondo UNI ISO 3133.

⁴ Parallelamente alla fibratura, media di 10 campioni prismatici 20x20 mm secondo UNI ISO 3787.

⁵ Media fra i valori di due pioli ϕ 12 e due ϕ 16.

⁶ Media di 17 provini cubici e 9 cilindrici.

⁷ Secondo UNI 6556, media su tre provini.

I fori sono praticati con ordinaria punta per acciaio, con diametro leggermente inferiore, rispettivamente $\phi = 11,75$ mm e $\phi = 15,75$ mm, in modo che i pioli debbano essere infissi con leggero forzamento (4 ÷ 5 colpi di martello). La soletta in calcestruzzo è armata con rete elettrosaldata $\phi 6$ mm a maglia 100x100 mm di acciaio FeB 44 K.

3. Prove di taglio dei connettori

La geometria dei provini (v. figura 2) è stata studiata in modo da poter simulare il comportamento di un singolo connettore di una trave mista. Ogni provino non è altro che una ideale tronco di una singola nervatura di solaio comprendente un solo connettore. La zona di contatto tra calcestruzzo e travetto è pari al passo dei connettori, in modo da ottenere un valore dell'attrito confrontabile con quello che in realtà si manifesta nella zona di competenza di un singolo connettore.

Si sono realizzati sei provini con pioli $\phi 12$ e calcestruzzo a diretto contatto col travetto e sei provini con pioli $\phi 16$ e assito interposto, due per ciascuna delle profondità di infissione dei pioli nel travetto di legno, fissate in 3, 4 e 6 volte il diametro.

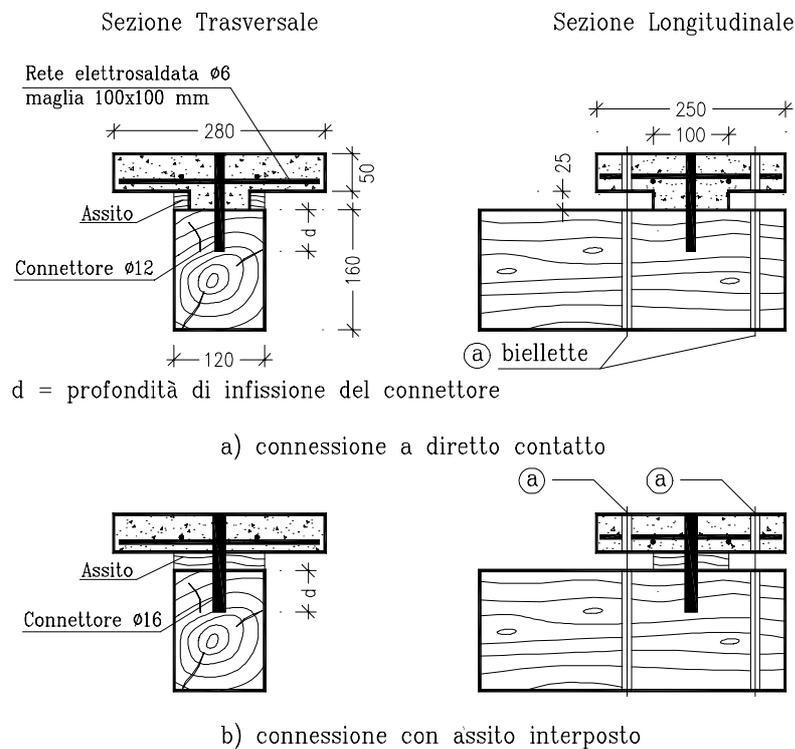


Fig. 2 - Caratteristiche geometriche dei provini

Il banco di prova (v. figura 3), già impiegato in studi simili /6/, è progettato per imporre slittamenti crescenti tra legno e calcestruzzo senza rotazioni mutue. La soletta in calcestruzzo è bloccata (v. fig. 4) nel telaio a forcina (a), mentre al travetto è incollata con resina epossidica la flangia (b). La forza F , applicata tramite una barra strumentata, giace nel piano medio dell'assito che però in generale non coincide con la posizione del "punto di flesso" del connettore. L'eccentricità tra la retta di carico e il punto di flesso, genera una coppia che, sia pure di modesta entità, causerebbe una rotazione relativa tra il travetto e la soletta; per questo motivo sono state

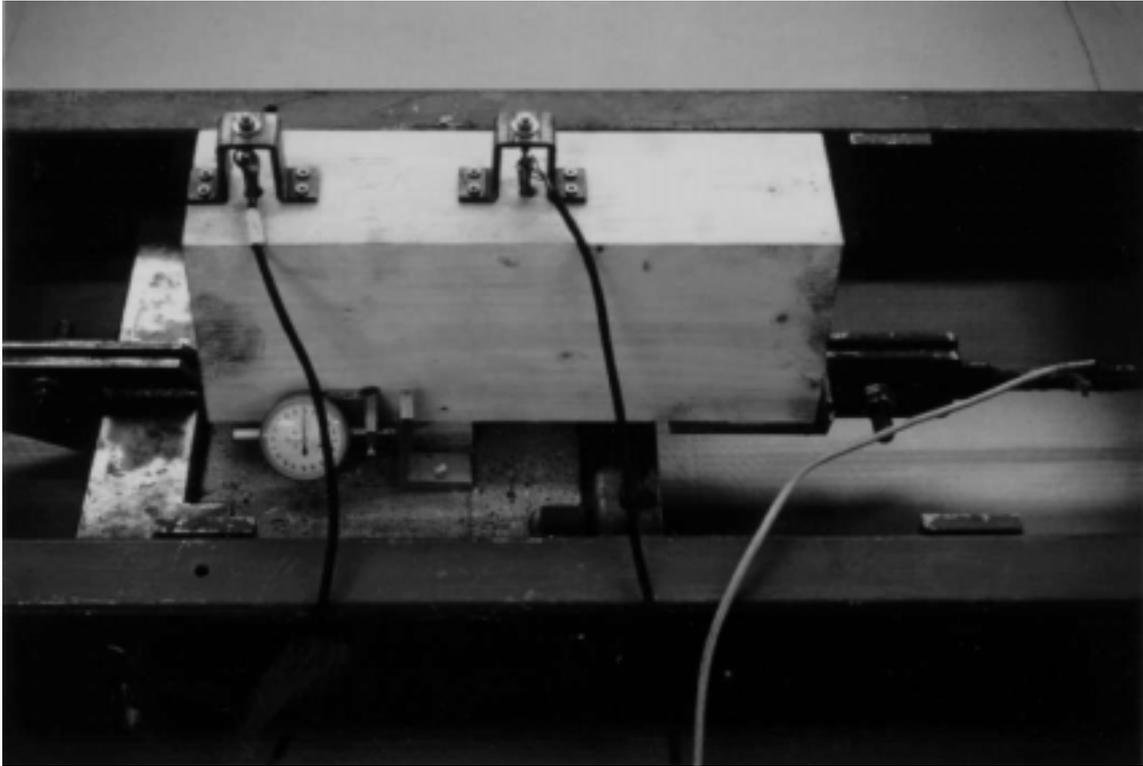


Fig. 3 - Banco di prova

inserite le due bielle (a) di figura 2. Tali bielle, del diametro di 6 mm, hanno sezioni di estremità ridotte e sono inserite in fori di maggior diametro per consentire gli slittamenti tra legno e calcestruzzo. Esse sono strumentate per permettere di misurare la loro azione assiale e quindi di calcolare la coppia e da essa la posizione del punto di flesso del connettore. La loro presenza non influenza in modo apprezzabile la forza applicata al connettore avendo una rigidezza complessiva a traslazione di soli 3 daN/mm. Lo slittamento relativo tra la soletta di calcestruzzo e il travetto di legno viene letto da due comparatori meccanici millesimali (v. fig. 3).

Su ciascun provino si sono effettuati 3 cicli di carico-scarico, con valore massimo del carico

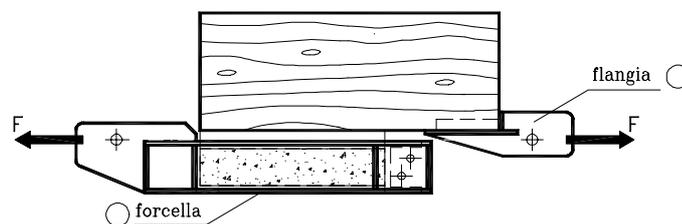


Fig. 4 - Modalità di applicazione del carico

di 300 daN, corrispondente approssimativamente alla forza di scorrimento da affidare ai connettori in esercizio. Si sono applicati incrementi di deformazione con variazioni del carico di 10-15 daN. Le letture sono state eseguite alla fine di ciascun passo di carico e dopo un assestamento di circa 5 minuti. Nel quarto ciclo di carico si è raggiunto la rottura convenzionale della connessione, corrispondente ad uno slittamento relativo di circa tre millimetri.

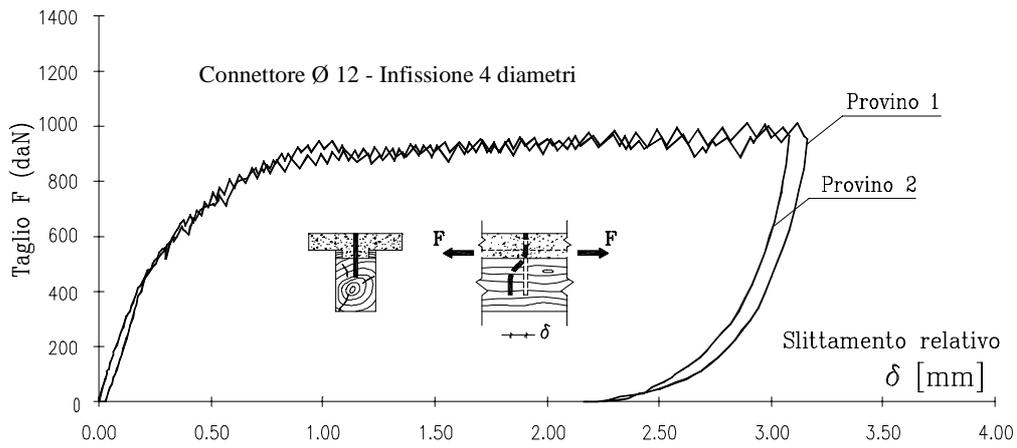


Fig. 5 - Diagramma sperimentale taglio/slittamento per connessione a diretto contatto

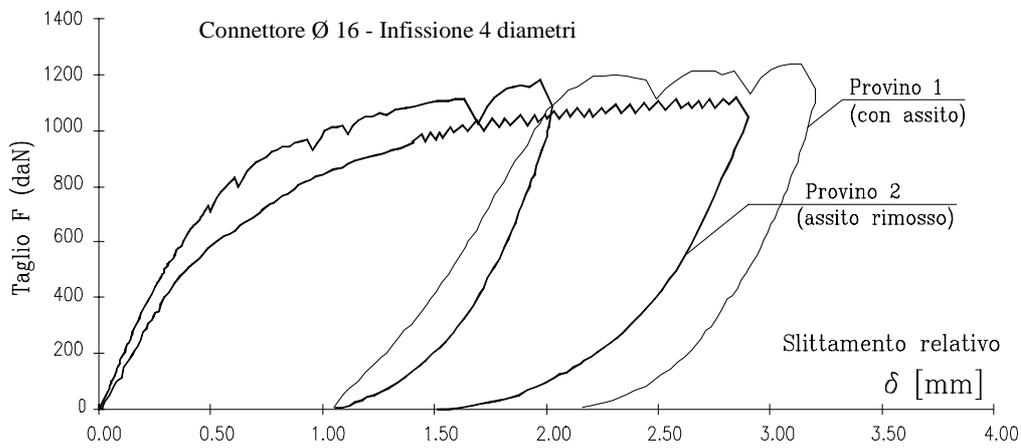


Fig. 6 - Diagramma sperimentale taglio/slittamento per connessione con assito

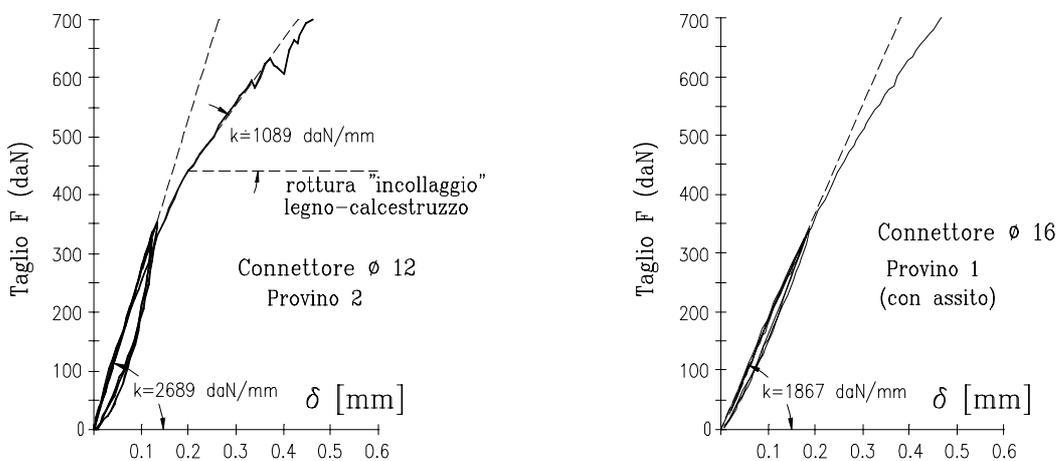


Fig. 7 - Primi cicli di carico e rigidezze iniziali

Nelle figure 5 e 6 sono riportati, i diagrammi taglio-slittamento dei provini con profondità di infissione del connettore di 4 diametri, corrispondente a quella adottata per le travi miste provate successivamente. Nella tabella II sono riportati, per tutti i provini, i valori della rigidità secante iniziale, valutata per un valore dello slittamento di 0.15 mm, e della resistenza ultima convenzionale, corrispondente ad un valore di slittamento di 3 mm.

Connettore	Infissione	Rigidità Iniziale [daN/mm]			Resistenza Ultima [daN]		
		Provino 1	Provino 2	Media	Provino 1	Provino 2	Media
φ 12	3 φ	2636	1925	2280	830	960	895
	4 φ	2474	2689	2582	950	950	950
	6 φ	2966	3259	3113	1140	1140	1140
φ 16	3 φ	1222	1063	1143	900	855	878
	4 φ	1867	1458	1663	1190	1100	1145
	6 φ	1375	1242	1309	1230	1100	1165

Tabella II - Rigidità iniziale e resistenza ultima dei connettori.

4. Comportamento sperimentale di travi miste

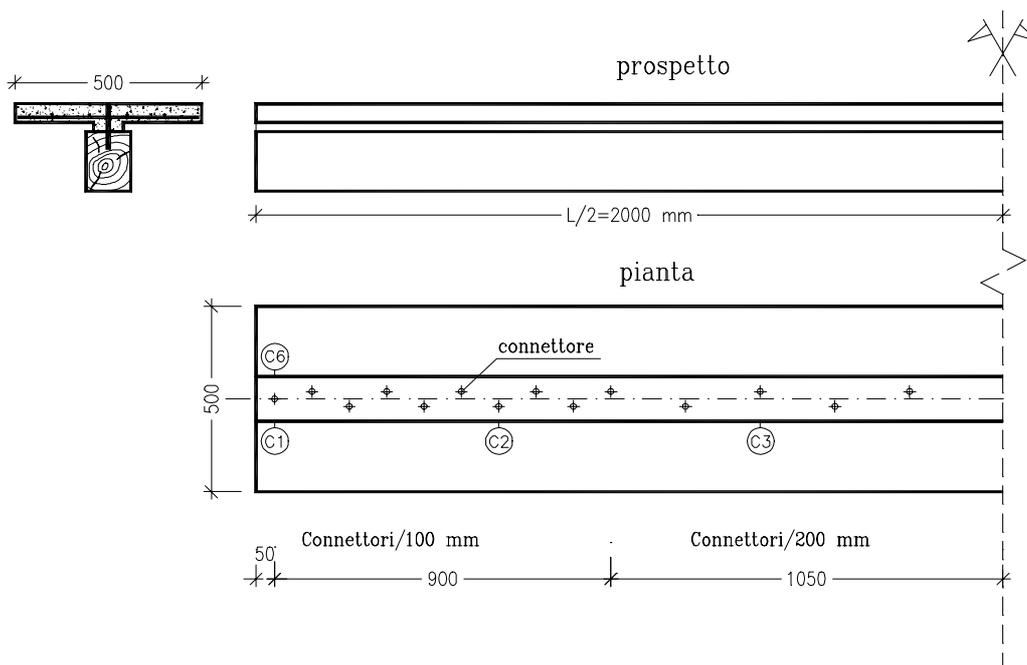
Per studiare il ruolo dei legami locali taglio-slittamento dei connettori sul comportamento globale a flessione, si sono provate due travi miste in legno-calcestruzzo che rappresentano le nervature di un solaio con interasse dei travetti di 50 cm.

Le due travi (figura 8) si differenziano per il tipo di connessione. Nella prima la cappa in calcestruzzo è a diretto contatto con il travetto con connettori φ 12 (connessione a diretto contatto). Nella seconda la cappa in calcestruzzo è gettata al di sopra dell'assito con connettori φ 16 (connessione con assito interposto). In entrambe le travi i connettori sono infissi nel travetto per 4 diametri. Le caratteristiche dei materiali e le modalità di posa dei connettori sono quelle adottate per le prove di taglio (v. par. 2).

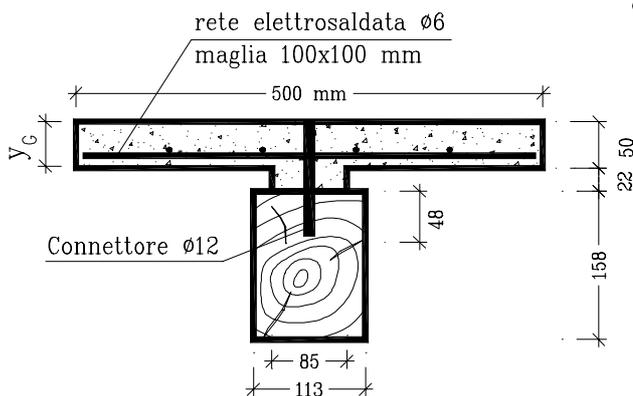
Nella figura 8 sono riportate le caratteristiche geometriche e meccaniche delle sezioni. In particolare sono evidenziate le caratteristiche meccaniche della sezione ideale, omogeneizzata al legno, nell'ipotesi di connessione perfetta, con coefficiente di omogeneizzazione $n = E_c/E_w = 3.26$. Sono inoltre indicati i valori di esercizio delle tensioni massime nel calcestruzzo e nel legno, calcolati nell'ipotesi di connessione ideale perfetta e di portanza del solo legno; si noti che il solaio di solo legno è notevolmente sottodimensionato, risultando in questo caso lo sforzo nel legno ($\sigma_{sw} = 170 \text{ daN/cm}^2$) circa due volte superiore al valore comunemente adottato.

I connettori hanno interasse di 10 cm nelle zone di taglio massimo (fino ad 1/4 della luce) e di 20 cm nel tratto centrale delle travi e sono sfalsati per evitare fenditure lungo la venatura della trave. Le solette sono armate con rete elettrosaldata φ 6 maglia 10x10 cm in acciaio FeB44k.

Le nervature sono progettate per un solaio con sovraccarico utile di esercizio di 400 daN/m² che, con l'aggiunta del peso proprio, corrisponde ad un carico totale di circa 550 daN/m². Poiché la luce netta è di 4,00 m e l'interasse delle nervature è di 0,5 m, il taglio massimo in esercizio risulta $T = 550 \text{ daN}$. I connettori vicini agli appoggi, che sono i più sollecitati, sono soggetti ciascuno ad una forza di scorrimento F valutata nell'ipotesi di connessione perfetta (350 daN e 373 daN



Connessione a diretto contatto



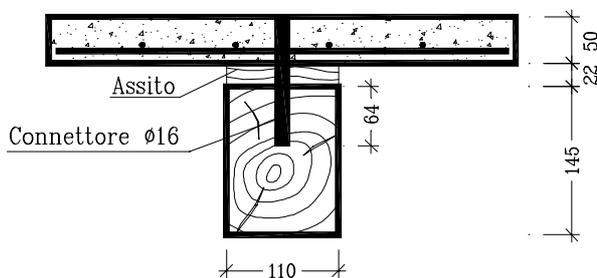
Caratteristiche delle sezioni ideali omogeneizzate al legno con $E_c/E_w = 3.26$

$$\begin{aligned}
 y_G &= 48 \text{ mm} \\
 J_{id} &= 28800 \text{ cm}^4 \\
 E_w &= 95000 \text{ daN/cm}^2 \\
 J_w &= 3714 \text{ cm}^4 \\
 S &= 1832 \text{ cm}^3 \\
 J_{id}/J_w &= 7.75
 \end{aligned}$$

Tensioni teoriche

$$\begin{aligned}
 \sigma_c &= 36.0 \text{ daN/cm}^2 \\
 \sigma_w &= 41.4 \text{ daN/cm}^2 \\
 \sigma_{sw} &= 138.7 \text{ daN/cm}^2
 \end{aligned}$$

Connessione con assito interposto



$$\begin{aligned}
 y_G &= 45 \text{ mm} \\
 J_{id} &= 23500 \text{ cm}^4 \\
 E_w &= 95000 \text{ daN/cm}^2 \\
 J_w &= 2795 \text{ cm}^4 \\
 S &= 1594 \text{ cm}^3 \\
 J_{id}/J_w &= 8.42
 \end{aligned}$$

Tensioni teoriche

$$\begin{aligned}
 \sigma_c &= 40.5 \text{ daN/cm}^2 \\
 \sigma_w &= 48.1 \text{ daN/cm}^2 \\
 \sigma_{sw} &= 170.2 \text{ daN/cm}^2
 \end{aligned}$$

NOTA:

σ_c σ_w sono le tensioni nel cls e nel legno calcolate col metodo n per il momento di esercizio $M=656 \text{ daNm}$ mentre σ_{sw} è calcolata nell'ipotesi di portanza del solo legno

Fig. 8 - Caratteristiche geometriche e meccaniche delle due travi miste

rispettivamente per i connettori $\phi 12$ e $\phi 16$), che corrisponde a circa $1/3$ del valore del taglio ultimo dei provini (950 daN e 1145 daN rispettivamente per i connettori $\phi 12$ e $\phi 16$).

Il banco di prova è mostrato nella figura 9. La trave (a), capovolta, è appoggiata sui due bilancieri (b) incernierati ai montanti (c). Le sollecitazioni sono impresse applicando agli estremi spostamenti verticali. Le forze applicate sono ricavate dalla lettura dei comparatori millesimali delle losanghe dinamometriche (d). Lo schema di carico di figura 9 corrisponde a quello di una nervatura di solaio ordito tra due pareti in muratura con una luce netta di 4 m, pari alla lunghezza della soletta di calcestruzzo, ed una luce di calcolo di 4,37 m. Le due testate metalliche (e), che prolungano il travetto in legno, non sono a contatto con la soletta per non impedire lo slittamento relativo della stessa rispetto al travetto di legno. Il peso proprio produce, sulla trave posta sul banco, azioni interne trascurabili. Oltre ai comparatori per la misura della freccia, si sono posizionati comparatori per la lettura degli slittamenti relativi fra soletta e travetto.

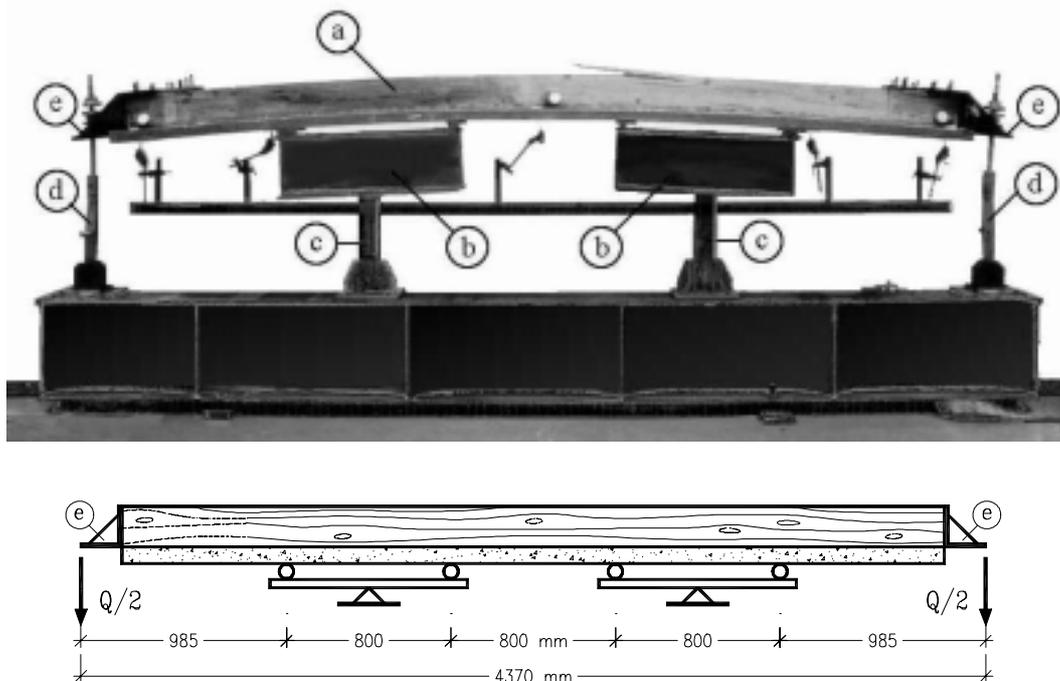
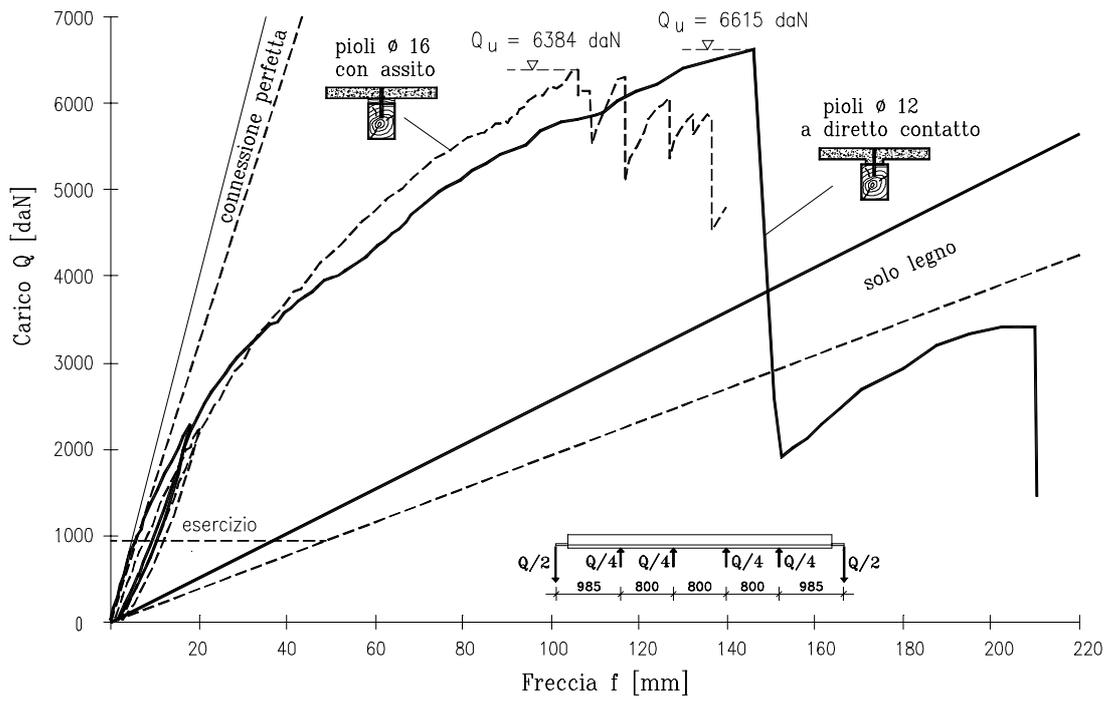


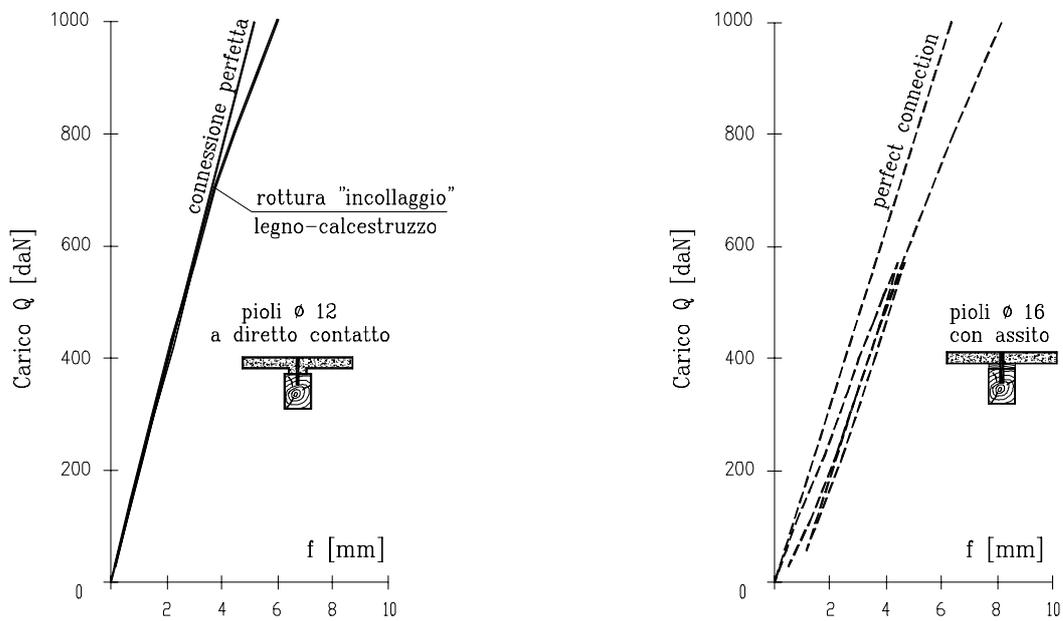
Fig. 9 - Banco di prova e schema di carico

Su entrambe le travi si sono eseguiti due cicli di carico fino al valore del carico totale $Q=600$ daN; un terzo ciclo di carico fino al valore $Q=2290$ daN ed infine il carico è stato fatto crescere fino alla rottura. Le prove sono state condotte con controllo delle deformazioni, con incrementi delle frecce ad ogni passo di $0.3 \div 0.4$ mm nei primi due cicli, di $0.5 \div 1$ mm nel terzo ciclo e di $1 \div 2$ mm nel quarto ciclo, e con velocità di carico corrispondente ad un passo ogni 5 minuti.

Nelle figure 10 e 11 sono riportati i diagrammi carico-freccia e carico-slittamento che mostrano un comportamento quasi linearmente elastico di entrambe le travi in esercizio ($Q \leq 948$ daN). In particolare la trave con connessione a diretto contatto (pioli $\phi 12$) ha un comportamento



a) terzo e quarto ciclo di carico



b) first and second load cycles

Fig. 10 - Diagrammi carico-freccia delle due travi miste

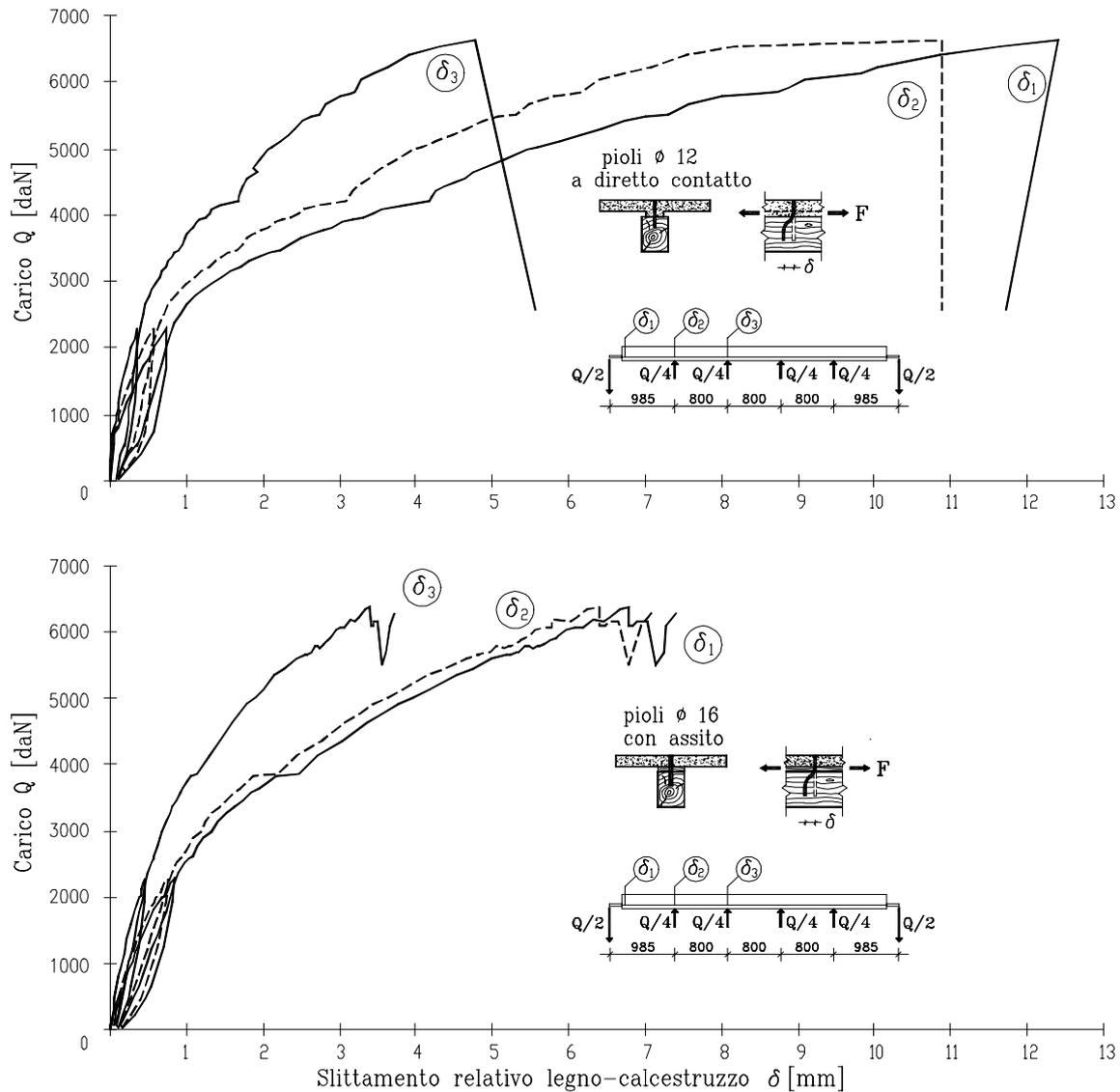


Fig 11 - Diagrammi carico-slittamento relativo delle due travi miste

coincidente con quello di connessione rigida fino ad un valore del carico pari a circa il 60% del valore di esercizio, comportamento dovuto all'”incollaggio” fra legno e calcestruzzo (v. Fig. 10b).

Nella tabella III sono messi a confronto, in corrispondenza del carico di esercizio $Q=948$ daN (che provoca un momento flettente in mezzaria uguale a quello di un carico distribuito di 275 daN/m sulla nervatura equivalente ad un carico di 550 daN/m² sul solaio), i valori sperimentali delle frecce con i valori teorici calcolati nelle ipotesi di connessione perfetta e di portanza del solo legno. La tabella mostra che la connessione perfetta conferisce alla trave mista una rigidità circa 8 volte superiore a quella della sola trave di legno (v. rapporto $f_w/f_l=7.75\div 8.42$ rispettivamente per le due travi). La deformabilità delle connessioni a piolo adottate riduce leggermente la rigidità complessiva delle due travi e provoca un incremento di freccia di circa il 20÷30% rispettivamente ($f_s/f_l = 1.17\div 1.32$).

Il carico ultimo (v. Fig. 10) è praticamente uguale per le due travi (rispettivamente $Q=6615$ e 6384 daN) pari a 7 e 6.7 volte il valore di esercizio, con frecce di 146 e 106 mm e slittamenti

massimi tra legno e calcestruzzo di 12 e 7 mm. In entrambi i casi il collasso è avvenuto per rottura a trazione del legno e con evidente fessurazione della soletta al lembo inferiore conseguente alla grande curvatura della trave.

Tipo di connessione	sperimentale	conn. perfetta	solo legno			
	f_s [mm]	f_i [mm]	f_w [mm]	f_w/f_i	f_s/f_i	f_w/f_s
diretto contatto	5.57	4.77	37.0	7.76	1.17	6.64
con assito	7.69	5.83	49.1	8.42	1.32	6.39

Tabella III - Valori sperimentali e teorici della freccia con carico di esercizio.

I valori sperimentali del carico ultimo e del corrispondente momento flettente sono in buon accordo con quelli calcolati secondo lo schema classico a rottura che prevede la connessione perfettamente plasticizzata, il legno a comportamento linearmente elastico fino a rottura e il calcestruzzo fessurato inferiormente con conseguente distribuzione rettangolare degli sforzi nella parte reagente (stress-block). Facendo riferimento alle seguenti caratteristiche meccaniche (v. tabella I):

- resistenza ultima del legno: $\sigma_{wu} = f_{wu} = 690 \text{ daN/cm}^2$
- resistenza ultima del calcestruzzo: $\sigma_{cu} = f_{cu} = 309 \text{ daN/cm}^2$
- resistenza ultima della connessione ϕ 12: $F_u = 950 \text{ daN}$
- resistenza ultima della connessione ϕ 16: $F_u = 1145 \text{ daN}$

si ottiene la forza di scorrimento totale di mezza trave (14 connettori) pari a $D = 13300 \text{ daN}$ per la trave con connettori ϕ 12 ($D = 16030 \text{ daN}$ per la trave con connettori ϕ 16). L'altezza dello stress-block risulta pari a 0.86 cm (1.04 cm) e pertanto la risultante delle compressioni sulla soletta ha eccentricità, rispetto al baricentro del travetto, pari a $z = 14.7 \text{ cm}$ ($z = 13.9 \text{ cm}$). Essendo:

$$M_u = D z + (\sigma_{wu} - D/A_w)J_w/(h_w/2)$$

con A_w e h_w l'area e l'altezza della sezione in legno (v. Fig. 8), si ottiene:

$$M_u = 4849 \text{ daNm} \quad (M_u = 4501 \text{ daNm})$$

a fronte di valori sperimentali pari a 4581 daNm (4421 daNm).

5. Conclusioni

Le prove sperimentali sulle travi miste con connettori a piolo infissi nel legno a secco consentono di fare le seguenti considerazioni:

- La tecnica appare operativamente semplice e adatta alla realtà dei cantieri ordinari di recupero edilizio.
- La connessione a pioli ϕ 16 con assito interposto tra soletta e trave di legno ha un comportamento molto prossimo a quello con i pioli ϕ 12 ma con calcestruzzo a diretto contatto del legno.
- La rigidità effettiva delle travi miste con i connettori a piolo adottati è risultata molto prossima a quella ideale corrispondente a connessione perfetta, con un incremento di freccia entro valori del 20 ÷ 30%
- Il comportamento sperimentale a rottura è in buon accordo con quello teorico secondo l'approccio classico ipotizzando per i pioli la completa plasticizzazione e considerando il legno a

comportamento elastico fino a rottura. Le differenze tra i valori ultimi sperimentali e teorici sono inferiori al 6 %.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare gli ingegneri Carlo Cattaneo e Ettore Nichetti per l'importante contributo nello svolgimento del lavoro sperimentale.

Bibliografia

- /1/ Turrini, G., Piazza, M., "Aspetti applicativi di tecniche di realizzazione di strutture miste legno-calcestruzzo", *Recuperare* N. 5, 6, 7, 1983.
- /2/ Giuriani, E., Frangipane, A., "Wood-to-Concrete Composite Section for Stiffening of Ancient Wooden Beam Floors", Università di Brescia, Dip. di Ingegneria Civile, Technical Report N. 14, 1991.
- /3/ Ronca, P., Gelfi, P., Giuriani, E., "The behaviour of a Wood-Concrete Composite Beam under Cyclic and Long Term Loads", "Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings II" proceedings of the second international conference held at Seville, Spain, Vol. 1, General studies, materials and analysis, 1. Historic buildings conservation, I. Brebbia, C.A., p. 263-275, 1991.
- /4/ Gelfi, P., Ronca, P., "Il consolidamento dei solai in legno: studio sperimentale sui connettori tra trave in legno e cappa in calcestruzzo armato" IV Congresso Nazionale ASSI.R.C.CO., Prato, 3-5 giugno 1992, pubblicato anche su *L'Edilizia* N. 5, maggio 1993, anno VII, p. 41-50.
- /5/ Gelfi, P., Giuriani, E., Cattaneo, C., Nichetti, E., "Travi miste in legno-calcestruzzo con connettori a piolo", Università di Brescia, Dip. di Ingegneria Civile, Technical Report N. 2, 1995.
- /6/ Gattesco, N., Giuriani, E., "Studio sperimentale sul comportamento di travi miste in acciaio e calcestruzzo sotto carichi ripetuti", *Studi e Ricerche*, Vol. 10, Corso di Perfezionamento per le Costruzioni in Cemento Armato F.lli Pesenti, Politecnico di Milano, p. 299-326, 1988.