

## UNA PARTICOLARE CONNESSIONE LEGNO-CALCESTRUZZO. ANALISI SPERIMENTALE E SIMULAZIONE NUMERICA

Paolo CLEMENTE<sup>1</sup>      Maurizio PIAZZA<sup>2</sup>      Roberto TOMASI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ENEA, Centro Ricerche Casaccia, Roma, Italia

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale, Università di Trento, Italia

**Keywords:** sezione mista, legno, calcestruzzo, connessione, scorrimento

### ABSTRACT

Si presenta una nuova tipologia di connessione per la formazione di una struttura composta legno-calcestruzzo, tra una trave di legno lamellare, di sezione rettangolare, dotata di una particolare fresatura ad incastro e di denti in legno, e un getto di completamento in conglomerato cementizio eseguito in opera, realizzata mediante l'utilizzo di malta cementizia antiritiro ad alta resistenza e di un traliccio in acciaio elettro-saldato. La validità del sistema di connessione descritto è dimostrata mediante un'adeguata serie di indagini sperimentali, che hanno consentito anche di determinarne rigidità e resistenza del sistema. Lo studio sperimentale è stato effettuato in due fasi: dopo una prima campagna sperimentale nella quale sono state studiate diverse soluzioni ai fini di un'analisi dell'influenza dei vari parametri sul comportamento, in una seconda fase l'attenzione si è concentrata sulla ricerca della soluzione ottimale anche a mezzo di una accurata modellazione numerica.

### 1 INTRODUZIONE

Com'è noto, nelle travi composte e in particolare quelle legno - calcestruzzo, si cerca di sfruttare al meglio le caratteristiche dei materiali componenti: alla soletta in c.a. sono affidati gli sforzi di compressione per quanto riguarda il comportamento flessionale, di ripartizione dei carichi e di diaframmatura (comportamento per azioni nel piano di solaio), mentre all'elemento ligneo sono affidati sforzi prevalentemente di trazione e di flessione. Tale collaborazione, però, è garantita soltanto se tra i due elementi non si verificano significativi scorrimenti. Pertanto, il comportamento statico della sezione composta legno-calcestruzzo è influenzato dalle rigidità flessionali ed assiali degli elementi componenti ma anche dalla rigidità specifica  $k$  della connessione tra di essi; tale comportamento è sempre compreso tra i due casi estremi di rigidità nulla ( $k=0$ , sforzi di scorrimenti nulli) e di rigidità infinita ( $k=\infty$ , massimo sforzo di scorrimento trasmesso) [1].

La possibilità di adottare sezioni miste legno - calcestruzzo è contemplata anche da recenti normative nazionali le quali, con riferimento al solaio, prescrivono che, affinché questo possa essere considerato infinitamente rigido nel proprio piano rispetto agli elementi verticali e sufficientemente resistente, debba presentare una soletta in c.a., di spessore almeno pari a 50 mm, collegata da connettori a taglio agli elementi in legno. In relazione a ciò, è anche bene ricordare che non è preclusa la possibilità di "altre soluzioni costruttive", per le quali "l'ipotesi di infinita rigidità dovrà essere valutata e giustificata dal progettista".

Al riguardo le Istruzioni CNR-DT 206 [2] recitano: "la connessione tra soletta e trave in legno va realizzata con sistemi dei quali sia stata dimostrata la validità per mezzo di adeguate campagne sperimentali condotte secondo le pertinenti norme. La rigidità  $K_{ser}$  e la capacità portante  $F_{v,Rk}$  della connessione trave-soletta dovranno essere determinate tramite prove sperimentali e sulla base di teorie di comprovata validità che tengano conto delle specifiche caratteristiche della connessione così come sarà utilizzata in opera". Le stesse istruzioni forniscono prescrizioni sulla rigidità e resistenza di connessioni realizzate con denti di calcestruzzo disposti entro opportune fresature nel legno e ottenuti mediante lo stesso getto della soletta. In tal caso la resistenza della connessione dipende dalla

resistenza a scorrimento longitudinale e a flessione locale del legno indebolito dalle fresature, dalla resistenza a taglio e flessione del dente di calcestruzzo e dalla resistenza a rifollamento del legno. In ogni caso, la valutazione della rigidità della connessione dovrà tener conto del reale comportamento sperimentale. Le medesime Istruzioni CNR-DT 206 ammettono ancora la possibilità di utilizzare “altri sistemi di connessione purché la resistenza e la rigidità vengano chiaramente individuate su base sperimentale e teorica”.

La memoria presenta una nuova tipologia di connessione legno-calcestruzzo che trova facile applicazione nel settore dei solai. Come richiesto da normativa, la validità del sistema di connessione tra soletta e trave in legno è stata dimostrata per mezzo di adeguate campagne sperimentali, che hanno consentito anche di determinarne rigidità e capacità portante. In particolare lo studio sperimentale è stato effettuato in due fasi: dopo una prima campagna sperimentale nella quale sono state prese in esame diverse soluzioni, una seconda campagna si è focalizzata sulla soluzione che appariva più promettente. Lo studio è stato supportato anche da un’accurata modellazione numerica.

## 2 CONNESSIONE LEGNO-CALCESTRUZZO

Il sistema di connessione in esame è riferito ad un elemento di trave in legno lamellare, di sezione rettangolare, dotato di una particolare fresatura ad incastro e di denti in legno lungo il tratto centrale (Figura 1), e al getto di completamento in conglomerato cementizio eseguito in opera: tale sistema si realizza mediante l'utilizzo di malta cementizia antiritiro ad alta resistenza e di un traliccio in acciaio elettro-saldato. Più in dettaglio la costruzione del sistema avviene in due fasi: nella prima, nella scanalatura dell'elemento in legno lamellare determinata dalla fresatura ad incastro e dai denti di legno, viene gettata la malta a stabilità volumetrica fino al quasi totale riempimento della fresatura e, a malta ancora fluida, viene inserito meccanicamente il traliccio; nella seconda, avviene il getto della soletta. La prima fase ha luogo sempre in stabilimento, a garanzia della qualità delle operazioni, la seconda quasi sempre in opera. Val la pena osservare che la presenza del traliccio, inserito nella fresatura, inibisce il distacco tra i due elementi componenti sul piano verticale.

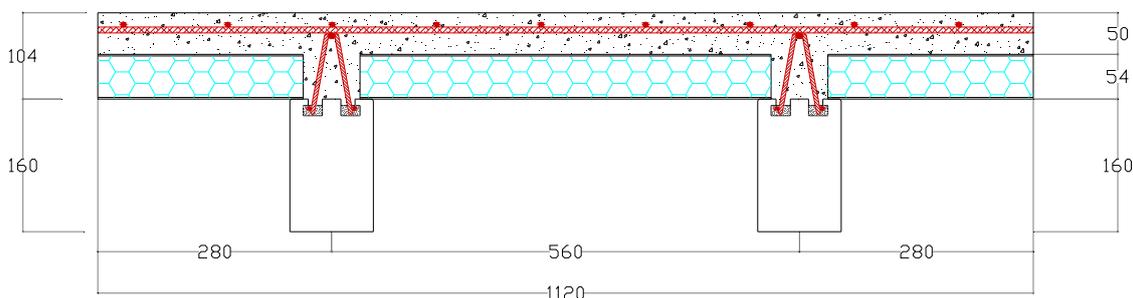


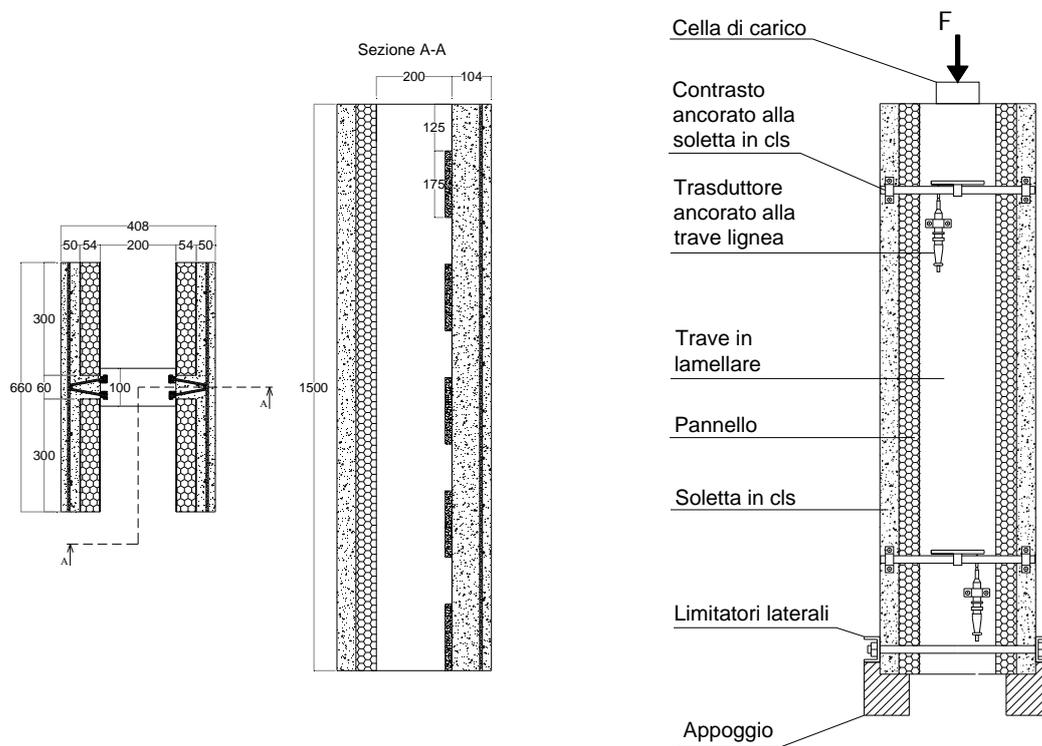
Fig. 1 Geometria dell'elemento in legno lamellare e della sezione mista.

## 3 INFLUENZA DEI VARI PARAMETRI SUL COMPORTAMENTO

In una prima campagna di indagine sono state prese in esame numerose soluzioni al fine di valutare l'influenza dei vari parametri in gioco, sulla base di sperimentazione fisica e numerica. In particolare per quanto attiene la fase sperimentale, sono stati realizzati provini di lunghezza pari a 1500 mm, ciascuno costituito da una trave in legno lamellare di dimensioni 100x200 mm, fresata su entrambe le facce e connessa a due solette in cemento armato con resistenza cubica  $R_{ck} = 25$  MPa, di larghezza 660 mm; le dimensioni di ciascun dente di legno, ove presente, sono pari a 18x18 mm e lunghezza variabile come più avanti specificato (Figura 2). Sono stati realizzati in totale 10 tipologie di campioni, che si differenziavano tra loro per il tipo di connessione, e due provini per ogni tipologia, per un totale di 20 campioni. In particolare, anche sulla base di una preliminare analisi numerica, sono stati previsti:

- valori del passo tra i denti di legno pari a 300, 400 e 500 mm, con lunghezza rispettivamente pari a 125, 150 e 170 mm;
- 2 tipologie di traliccio: senza e con tralicci orizzontali saldati nel piano della connessione, in corrispondenza dei denti di calcestruzzo, tra due denti di legno successivi;
- 2 tipi di getto di riempimento: diretto o con interposizione di malta a ritiro compensato, avente comunque modulo elastico simile a quello del calcestruzzo;

- l'interposizione o meno di prodotto a base epossidica, avente il duplice scopo di proteggere il legno dall'umidità del getto e di aumentare l'aderenza tra legno e malta;
- 2 tipologie di scanalatura: rettangolare o a coda di rondine.



**Fig. 2** Sezioni del provino, schema di prova e strumentazione.

Le prove sperimentali, relativamente a questa fase iniziale della ricerca, sono state effettuate presso il Laboratorio Strutture dell'ISTEDIL di Guidonia Montecelio (Roma). Il carico è stato applicato mediante un martinetto idraulico che contrastava su un telaio di riscontro secondo lo schema riportato in figura 2. Durante la prova sono stati acquisiti elettronicamente il carico applicato e lo scorrimento relativo tra trave e soletta per mezzo di 4 trasduttori. I limitatori laterali posizionati alla base dei campioni garantivano una reazione di serraggio, per prevenire l'apertura dei provini.

Le prove sono state condotte secondo le norme UNI EN 26891 [3]. Noto il carico ultimo del provino  $F_U$  (inizialmente stimato sulla base di valutazione teoriche ed eventualmente corretto durante l'esecuzione delle prove) si è applicata la seguente procedura di carico:

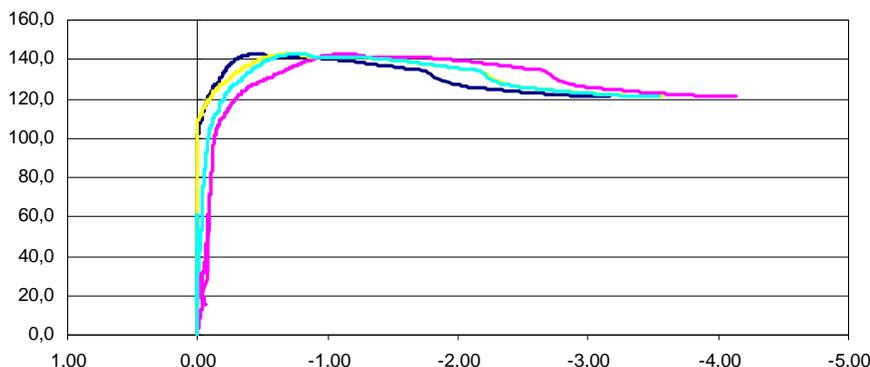
- carico crescente fino a  $0.4 \cdot F_U$ , con una velocità di applicazione del carico costante e pari a  $0.2 \cdot F_U/\text{min}$ , mantenuto tale per 30 s;
- carico decrescente fino a  $0.1 \cdot F_U$  e mantenuto tale per 30 s;
- carico crescente fino al carico ultimo oppure ad uno scorrimento di 15 mm; per  $F > 0.7 \cdot F_U$  la velocità dello scorrimento è stata regolata in modo tale da raggiungere il carico ultimo in un tempo di prova addizionale da 3 a 5 min.

Per ognuna delle venti prove effettuate sono stati ricavati i diagrammi carico-scorrimento relativi ai 4 trasduttori elettronici, 2 dei quali posizionati in alto e 2 in basso, ed inoltre il carico massimo e lo spostamento massimo a rottura e la rigidità in esercizio. In figura 3 sono riportati, a titolo di esempio, i diagrammi carico-tempo e carico-scorrimento relativi ad uno dei provini.

I campioni senza i denti di legno hanno evidenziato un comportamento carico-scorrimento del tipo elasto-plastico, con il tratto orizzontale che si manifesta al superamento del valore di aderenza legno-calcestruzzo. I campioni con i denti di legno, invece, hanno mostrato un comportamento più complesso: al primo tratto di rigidità finita, seguono un breve tratto orizzontale di scorrimento a carico costante, dovuto al superamento della soglia di aderenza, un successivo tratto crescente di rigidità minore, un ulteriore tratto orizzontale relativo al superamento della resistenza allo schiacciamento dei denti di legno, e infine un tratto discendente.

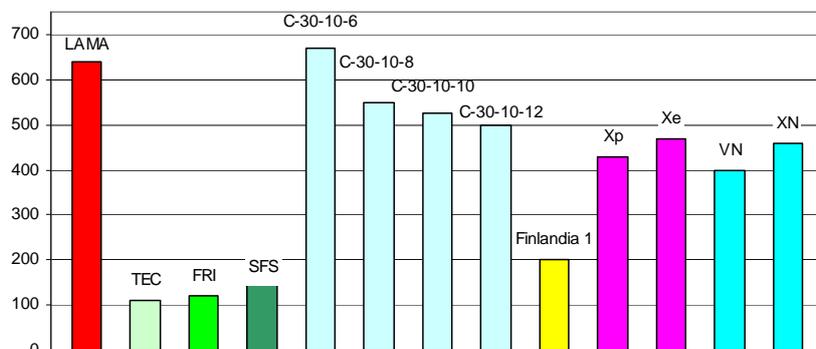
Inoltre, con riferimento alle resistenze, si è osservato che:

- la connessione senza denti ma con getto di malta, che fa affidamento esclusivamente sulla aderenza, presenta valori di resistenza doppi rispetto a quelli della connessione che era stata originariamente proposta in assenza di denti e di malta;
- le resistenze specifiche relative ai provini con i denti di legno e malta sono comprese in un intervallo tra 50 e 60 N/mm<sup>2</sup>; la presenza dello strato di resina aumenta tale resistenza del 15% circa;
- la modifica del traliccio in corrispondenza dei denti di calcestruzzo non comporta alcun incremento della resistenza, avvenendo la rottura per schiacciamento dei denti di legno.



**Fig. 3** Diagrammi carico (kN) – scorrimento (mm) tipici di un provino, come rilevato dai quattro trasduttori posizionati come in figura 2.

Infine, tutte le nuove tipologie di connessione mostrano rigidzze in campo elastico  $K_{ser}$  circa doppie rispetto a quella della connessione originale e abbastanza simili tra loro, come prevedibile essendo, in tutti i casi, il tratto iniziale della curva carico - scorrimento governato dall'aderenza. La rigidzza media normalizzata di tutti i provini con connessione a denti di legno è pari a circa 500 N/mm<sup>2</sup>, valore certamente ragionevole se confrontato con i risultati di numerose esperienze precedenti su tipologie simili [4] o con assai differenti tipologie di connessione legno - calcestruzzo, alcune delle quali riassunte nel diagramma di figura 4, ripreso dai riferimenti [5] e [6].



**Fig. 4** Rigidezze normalizzate (N/mm<sup>2</sup>) delle prove di push-out svolte presso l'Università degli Studi di Trento e presso l'Università degli Studi di Helsinki (da Ballerini et al., 2002).

#### 4 INTERPRETAZIONE E MODELLAZIONE

La fase sperimentale preliminare della ricerca ha evidenziato la possibilità di migliorare il comportamento della connessione, con particolare riferimento allo stato limite ultimo. L'osservazione diretta delle condizioni dei denti di legno a fine prova, previa apertura dei campioni, ha dimostrato l'importanza della resistenza allo schiacciamento dei denti e, quindi, dell'incremento del loro numero con riduzione della lunghezza e, quindi, del passo.

Sulla base di tali osservazioni è stato impostato uno studio numerico con l'ausilio del codice Ansys 9.0, preliminare ad una ulteriore fase sperimentale, prendendo in esame provini con denti con

passo 300 mm e getto di malta, con lunghezza del provino pari 600 mm (due volte il passo dei denti), al fine di sfruttare la doppia simmetria della loro sezione trasversale.

I provini sono stati discretizzati utilizzando elementi SOLID45 a 8 nodi, con funzioni di forma lineari. Nella realizzazione della mesh di elementi finiti è stato effettuato un infittimento nella zona di maggior interesse vicina ai pioli di legno, al fine di ottenere una distribuzione tensionale più accurata.

L'elemento in calcestruzzo è stato schematizzato come omogeneo e isotropo, ipotizzando, inoltre, una perfetta aderenza tra malta ( $f_{ck} = 65 \text{ N/mm}^2$ ,  $E = 36000 \text{ N/mm}^2$ ), acciaio e getto di calcestruzzo ( $f_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2$ ,  $E = 29000 \text{ N/mm}^2$ ).

Per il legno lamellare si è fatto riferimento alla classe resistente GL24h, le cui caratteristiche meccaniche di rigidezza e di resistenza sono state ricavate dalla normativa EN 1194 [7]. In fase elastica è stato definito il materiale ortotropo ( $E_x = 11600$ ,  $E_y = E_z = 390 \text{ N/mm}^2$ ,  $PR_{xy} = PR_{yz} = PR_{xz} = 0.3$ ,  $G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = 720 \text{ N/mm}^2$ ). In fase post-elastica sono stati definiti, per ciascuna direzione principale, i valori delle tensioni di snervamento a trazione, compressione e a taglio, completando una superficie di rottura secondo il criterio di rottura di Norris. Si osserva che il modello adottato definisce valori della trazione ortogonale alla fibratura sensibilmente discosti da quelli della normativa ma tale grossolana approssimazione è irrilevante nella valutazione della resistenza ultima dei provini, legata in definitiva alla resistenza a compressione parallela alla fibratura, che determina la rottura per schiacciamento del dente.

Le superfici di contatto legno-malta e legno-clc sono state modellate con elementi di superficie a 4 nodi *CONTA173* e *TARGE170*, che consentono di ottenere un contributo di resistenza dovuto alla aderenza tra i due materiali (modellato tramite un comportamento ad attrito), di variare la pendenza del tratto iniziale della curva carico-scorrimento in modo che la curva ottenuta dal modello abbia una rigidezza iniziale simile alla rigidezza media dei provini e di evitare la compenetrazione fra i denti di legno e quelli di calcestruzzo. I valori dei coefficienti di attrito attribuiti (pari a 0.55 per il contatto legno-malta e 0.30 per il contatto legno-calcestruzzo) sono stati determinati al fine di un riscontro numerico - sperimentale per questo particolare modello numerico e, come tali, non hanno una precisa valenza fisica e non possono essere assunti come valori di riferimento in assoluta generalità.

È stata simulata numericamente una prova di scorrimento in controllo di spostamento, impedendo lo spostamento longitudinale della faccia inferiore dell'elemento in calcestruzzo per simulare il contrasto ed imponendo uno spostamento pari a 5 mm alla faccia superiore dell'elemento in legno, procedendo in controllo di spostamento mediante step sufficientemente piccoli. Il modello è stato tarato in modo da ottenere una curva carico-scorrimento simile a quelle sperimentali. In figura 5 è riportata la deformata del dente di legno.

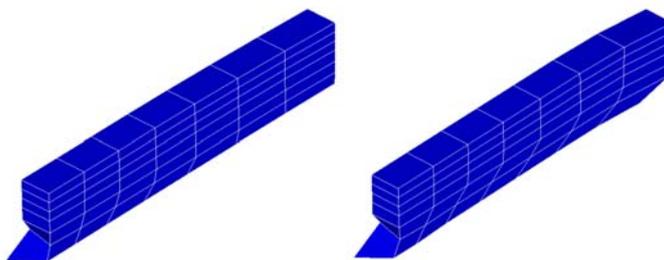
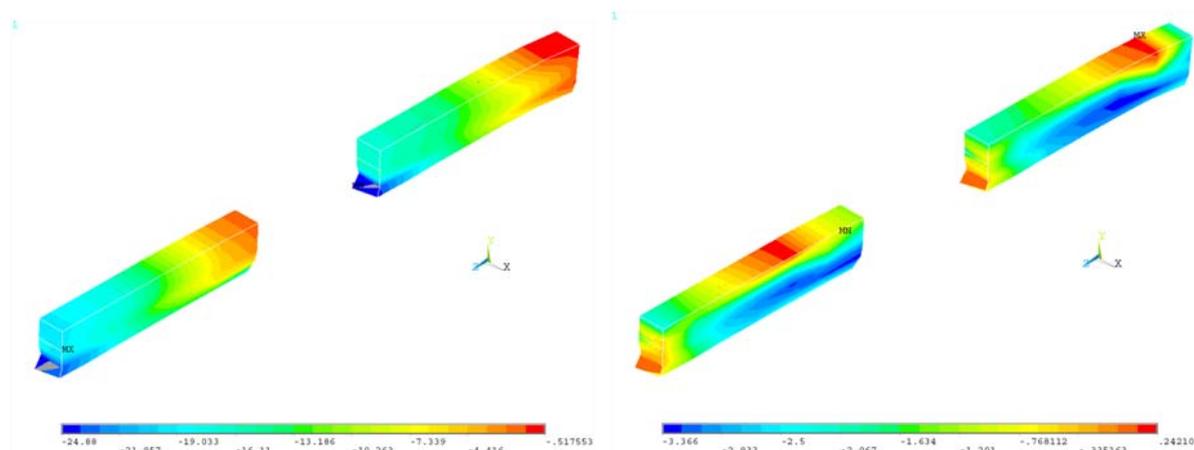


Fig. 5 Deformata del dente di legno a) interno e b) di estremità.

I pioli di legno presentano, ovviamente, deformazioni molto maggiori rispetto a quelle del conglomerato e raggiungono lo schiacciamento nella parte anteriore compressa contro il calcestruzzo, mentre rimangono quasi indeformati nella parte opposta. Nel dente di estremità, invece, si nota una deformazione a taglio più pronunciata che interessa, quindi, anche la parte terminale e in alcuni campioni si è osservata la rottura per scorrimento.

Nelle figure 6a e 6b sono riportate, rispettivamente, le distribuzioni delle tensioni di compressione parallela alle fibre, e delle tensioni tangenziali, che raggiungono valori prossimi alla corrispondente resistenza, nei denti di legno. Si può notare che la massima tensione tangenziale si sviluppa nella sezione di base dei denti di legno, in corrispondenza dell'attacco con il travetto, raggiungendo un valore prossimo al valore limite per un'area non molto estesa, non sufficiente a determinare la rottura del dente a taglio e lo scorrimento dello stesso. Inoltre la massima tensione di compressione parallela si sviluppa sulla faccia verticale dei denti di legno a contatto con il getto di malta e di calcestruzzo; si può osservare anche che il valore massimo è attinto soltanto nella parte iniziale dei denti e non lungo tutto il loro volume.

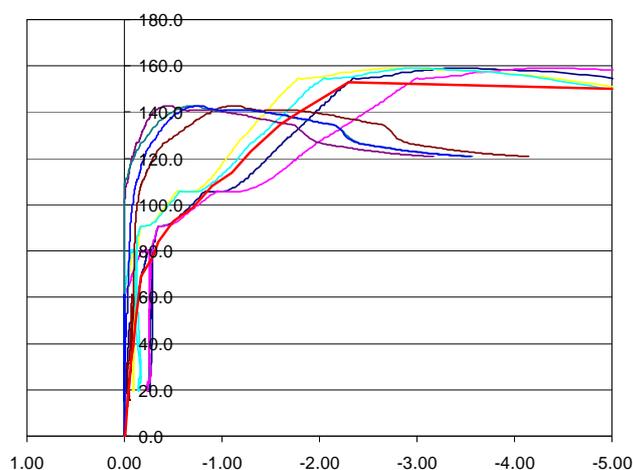


**Fig. 6** Modello con denti di legno a passo 150 mm: tensione di compressione parallela alla fibratura (sinistra) e tensione tangenziale (destra).

Lo spostamento imposto è stato applicato attraverso successivi incrementi, per ciascuno dei quali si è ottenuta la soluzione in termini di tensioni e di deformazioni e, quindi, si è ricavato il diagramma carico-spostamento. Le caratteristiche del modello sono state tarate in modo da ottenere una curva intermedia tra quelle ottenute sperimentalmente rispetto sia alla rigidità iniziale sia al carico ultimo.

In figura 7 è rappresentata la curva ottenuta insieme a quelle sperimentali. Come può evincersi dal grafico, la curva simulata mostra una rigidità iniziale di  $420 \text{ N/mm}^2$  e una resistenza ultima normalizzata di  $50 \text{ N/mm}$ , valori molto prossimi ai corrispondenti valori medi ricavati nei provini reali.

L'analisi numerica ha confermato che la crisi della connessione avviene per schiacciamento dei denti del legno; pertanto, al fine di ridurre la sollecitazione su ciascun dente, i provvedimenti che si devono prendere in considerazione riguardano sia l'incremento del numero di denti per unità di lunghezza sia l'incremento della sezione trasversale dei denti.



**Fig. 7** Confronto tra le curve carico (kN) – spostamento (mm) sperimentali e quella numerica (tratto spesso rosso).

## 5 RIGIDEZZA E RESISTENZA DELLA CONNESSIONE

Lo studio sperimentale precedente e l'analisi numerica hanno fornito le indicazioni necessarie per definire quella che al momento appare la soluzione ottimale che contempera i requisiti statici con le esigenze costruttive. Proprio con riferimento a tali esigenze, è stata effettuata una seconda campagna sperimentale, utilizzando 12 campioni da sottoporre a prova di scorrimento e 8 campioni di solaio da sottoporre a prova di flessione. Per la connessione sono stati utilizzati due tipi di malta (nel seguito definiti M1, già utilizzata nella campagna precedente, e M2) e due valori per la lunghezza dei denti di legno (100 mm e 50 mm), conservando la distanza netta tra due denti successivi, ossia la lunghezza del dente di calcestruzzo, pari a 50 mm, e le dimensioni trasversali pari a  $20 \times 22 \text{ mm}$ . Tutte queste prove

sono state effettuate presso il Laboratorio Prove Materiali e Strutture della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Trento.

### 5.1 Prove push-out

I campioni sono costituiti ciascuno da due spezzoni di trave di legno lamellare di lunghezza 450 mm e sezione 100x120 mm con fresatura sulla faccia a contatto con il calcestruzzo, collegati ad un elemento centrale di calcestruzzo armato di lunghezza 450 mm e sezione 160x100 mm (Figura 8). In tutti i campioni sono stati inseriti listelli di legno tra gli elementi in legno lamellare e il getto di calcestruzzo centrale al fine di simulare la presenza dell'elemento di interposizione e, quindi, la reale superficie di contatto tra legno e soletta in calcestruzzo. Sono stati ottenuti, in definitiva, le 4 differenti tipologie di connessione indicate in tabella 1, per ciascuna delle quali sono stati realizzati 3 esemplari.

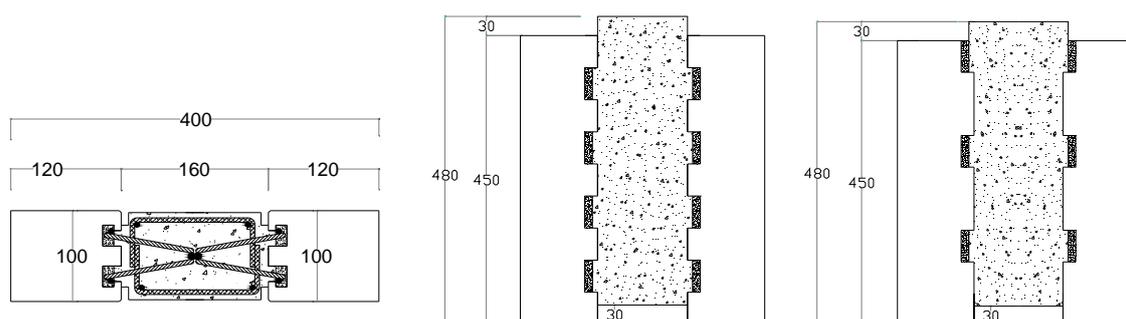
**Tab. 1** Tipologie dei campioni di prova realizzate.

<i>Sigla provino</i>	<i>Numero provini</i>	<i>Passo denti (mm)</i>	<i>Lunghezza denti (mm)</i>	<i>Malta</i>
P10M1 (a,b,c)	3	100	50	M1
P10M2 (a,b,c)	3	100	50	M2
P15M1 (a,b,c)	3	150	100	M1
P15M2 (a,b,c)	3	150	100	M2

Le prove di push-out sono state effettuate secondo lo schema di figura 9. Il carico sui campioni è stato applicato mediante la macchina di prova Galdabini (portata massima 100 kN). Durante la prova sono stati acquisiti, mediante centralina elettronica asservita a computer, il carico applicato e lo scorrimento relativo fra gli elementi in legno e la soletta, misurato tramite 4 trasduttori induttivi. Per ogni campione sono stati realizzati due strati in gesso alla base degli spezzoni di trave ed uno in sommità alla parte centrale di calcestruzzo per ottenere la perfetta planarità delle superfici di appoggio e la loro ortogonalità rispetto alla direzione di applicazione del carico.

Per ogni prova sono stati ricavati i diagrammi carico - scorrimento relativi ai 4 trasduttori di spostamento (Figura 10) e successivamente, dopo averne verificato la congruenza, il diagramma carico-scorrimento medio. Su tali diagrammi sono stati ricavati:

- il carico di rottura  $F_u$  e lo scorrimento medio  $\delta(F_u)$  in corrispondenza di esso, nonché la resistenza normalizzata rispetto alla lunghezza della connessione;
- le rigidzze normalizzate rispetto alla lunghezza della connessione calcolate in corrispondenza di prefissati livelli di carico  $F$  rispetto al carico di rottura  $F_u$ .



**Fig. 8** Sezione e geometria dei campioni di prova tipo "push-out".

Le curve carico-scorrimento ottenute hanno confermato quanto già precedentemente riscontrato: al primo tratto di elevata rigidezza seguono un breve tratto orizzontale (scorrimento a carico costante, dovuto al superamento della aderenza), un successivo tratto elastico con rigidezza minore rispetto al tratto iniziale (nel corso del quale la resistenza è affidata ai denti), un tratto orizzontale a carico costante più o meno esteso (quando è vinta la resistenza allo schiacciamento dei denti di legno) e, infine, un tratto discendente.



Fig. 9 Macchina di prova "Galdabini" e disposizione della strumentazione durante la prova.

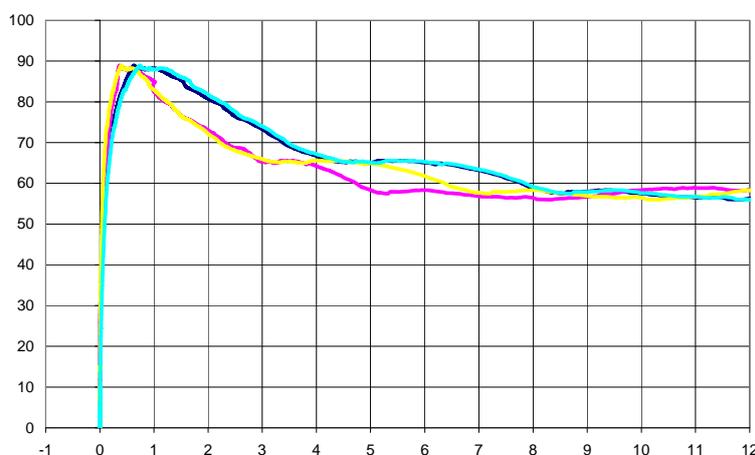


Fig. 10 Diagrammi carico (kN) – scorrimento (mm) dei quattro trasduttori del campione P15M1a (ai valori di carico indicati si deve sommare il peso del dispositivo di ripartizione pari a  $0.8 \text{ kN/m}^2$ ).

In tabella 2, per ciascuna tipologia di connessione, sono riportate le resistenze normalizzate medie (cioè le resistenze divise per la lunghezza della connessione, pari a 420 mm, su ciascuna faccia). Sono inoltre riportate le rigidezze normalizzate medie  $k_{\text{ser}}$  (corrispondenti alla retta secante passante per i punti della curva al carico  $0.1 \cdot F_u$  e  $0.4 \cdot F_u$ ) e le rigidezze normalizzate medie allo stato limite ultimo  $k_u$  (corrispondenti alla retta secante passante per i punti della curva al carico  $0.1 \cdot F_u$  e  $0.8 \cdot F_u$ ).

Tab. 2 Resistenze e rigidezze normalizzate medie dei campioni push-out.

Sigla provino	Resistenza normalizzata (N/mm)	Rigidezze normalizzate (N/mm <sup>2</sup> )	
		$k_{\text{ser}}$	$k_u$
P10M1 (a,b,c)	93	2413	702
P10M2 (a,b,c)	87	4432	947
P15M1 (a,b,c)	102	1428	372
P15M2 (a,b,c)	72	901	381

## 5.2 Prove di flessione

I campioni sottoposti a prova sono porzioni di solaio legno-calcestruzzo di larghezza 1.12 m e lunghezza  $L = 5.5$  m. Ogni campione è composto da due travi di legno lamellare di lunghezza 5500 mm e sezione 100x160 mm, con fresatura sulla faccia superiore e soletta di spessore 50 mm in calcestruzzo  $R_{ck} \cong 30$  MPa. Tra trave lignea e soletta si forma un elemento di calcestruzzo (sezione 50x54 mm), attraversato dal traliccio elettrosaldato, avente la sola funzione di cassero. I campioni sono stati realizzati con 4 differenti tipologie di connessione, come riportato in tabella 3.

Le prove di flessione sono state effettuate secondo lo schema di prova rappresentato nelle figure 11 e 12. Il carico è stato applicato su 4 linee per mezzo di travi di ripartizione in acciaio; il numero e la posizione di tali linee sono stati determinati in modo da indurre nel solaio effetti (momento massimo, taglio massimo e freccia in mezzzeria) simili a quelli indotti da un carico uniformemente distribuito di pari risultante. La forza è stata applicata utilizzando un martinetto idraulico da 630 kN collegato ad una traversa di riscontro vincolata al pavimento del laboratorio, posta in asse al punto medio delle travi in prova, ed alla trave di ripartizione principale. In corrispondenza degli appoggi e dei punti di applicazione del carico sono state poste delle piastre di ripartizione d'acciaio di larghezza 100 mm. Gli appoggi sono stati realizzati con dei rulli, di cui uno fisso (cerniera) e l'altro atto a consentire gli spostamenti longitudinali (carrello).

**Tab. 3** Tipologie dei campioni di solaio.

<i>Sigla provino</i>	<i>Numero provini</i>	<i>Passo denti (mm)</i>	<i>Lunghezza denti (mm)</i>	<i>Malta</i>
S10M1 (a, b)	2	100	50	M1
S10M2 (a, b)	2	100	50	M2
S15M1 (a, b)	2	150	100	M1
S15M2 (a, b)	2	150	100	M2

Durante la prova sono stati rilevati con continuità il carico totale applicato al campione, gli abbassamenti in mezzzeria (canali G1 e G2) ed in due punti distanti 530 mm ( $L/10$ ) dalla mezzzeria (canali G3, G4, G5 e G6) tramite 6 misuratori di spostamento resistivi GEFran, e gli scorrimenti relativi trave-soletta agli appoggi (canali T1, T2, T3 e T4) tramite 4 trasduttori induttivi HBM. La forza imposta è stata rilevata con una cella di carico (da 300 kN, classe 1) interposta tra il martinetto e la trave. Al carico impresso dal martinetto va aggiunto il peso proprio delle travi di ripartizione secondarie e dei traversi, pari a 4.72 kN, corrispondente ad un carico uniformemente distribuito di 0.8 kN/m<sup>2</sup>.

Per ogni prova si sono ricavati i diagrammi carico - scorrimento relativi alle testate delle travi e i diagrammi carico - abbassamento, determinando il carico di rottura e i valori di scorrimento e di freccia in corrispondenza di prefissati livelli di carico.

La forza massima che impegna la connessione, in corrispondenza delle testate, è stata ricavata mediante la relazione  $F = V \cdot \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1 \cdot s_1 / (EJ_{ef})$  [8], determinando il parametro  $\gamma_1$  e i valori  $a_1$  e  $EJ_{ef}$  sulla base dei valori di rigidità normalizzata allo stato limite ultimo  $k_u$ , ottenuti dalle prove elementari push-out. È stato riscontrato un ottimo accordo tra i valori della sollecitazione sulla connessione, così determinati, in corrispondenza del carico di rottura del solaio e quelli ricavati dalle prove push-out. Ciò dimostra come, a fronte di un elemento ligneo molto esile sulla luce di appoggio (rapporto luce/altezza sezione pari a circa 35), la tipologia "struttura composta" sia essenziale per la statica del solaio e come la rottura del collegamento anticipi di poco la messa fuori servizio del medesimo. I risultati e i corrispondenti diagrammi di tutte le prove sono riportati nei pertinenti rapporti di prova. In figura 13 sono rappresentati i diagrammi carico - scorrimento e le curve carico - freccia di due trasduttori del provino S15M1a. In tutti i provini, il carico di rottura è stato registrato in corrispondenza di un primo cedimento della connessione; dopo tale carico sono seguite una o più riprese di carico fino alla rottura di una trave in legno lamellare per trazione innescata sempre dalla presenza di un nodo nella lamella inferiore in zona centrale o di un giunto a dita nella medesima (Fig. 12).

Nelle figure da 14 a 16 sono riportati, a titolo di esempio per il campione S15M1a, i diagrammi delle seguenti variabili in funzione del carico applicato:

- il valore della freccia, confrontata con i valori teorici relativi ai casi limite di rigidità nulla della connessione ( $EJ_0 = 1.79 \cdot 10^{12}$  Nmm<sup>2</sup>) ed infinita ( $EJ_\infty = 9.10 \cdot 10^{12}$  Nmm<sup>2</sup>), valutati assumendo i valori dei moduli elastici dei materiali  $E_{LLGL24} = 11600$  e  $E_{CLSRck30} = 31400$  Nmm<sup>2</sup>;
- la rigidità efficace  $EJ_{ef} = 5 \cdot q \cdot L^4 / (f \cdot 384)$ ;
- la efficienza della connessione, espressa dal parametro  $\eta = (EJ_{ef} - EJ_0) / (EJ_\infty - EJ_0)$ .

Si rammenta come, nella lettura dei diagrammi, ai valori di carico imposto dal martinetto debba essere sommato il peso proprio delle travi di ripartizione pari a 0.8 kN/m<sup>2</sup>. Il peso proprio dei solai sottoposti a prova è invece pari a circa 1.6 kN/m<sup>2</sup>.

Infine, la figura 17 mostra la relazione momento - curvatura per il medesimo campione S15M1a, ricavata nel tratto centrale a momento costante, con momento flettente pari a  $P \cdot L/8$  (si veda la figura 11). Tale relazione è posta a confronto con le corrispondenti relazioni teoriche dei casi limite di rigidità della connessione nulla ed infinita. Sono anche indicati, con due tratti orizzontali, i valori dei momenti

flettenti limiti nei due casi citati: quello superiore, relativo alla connessione a rigidità infinita, è raggiunto per una resistenza a flessione nel legno pari a 24 MPa, mentre quello inferiore, relativo alla connessione a rigidità nulla, è determinato per raggiungimento della resistenza a compressione nel calcestruzzo (resistenza cilindrica pari a 24,9 MPa).

La tabella 4 riassume sinteticamente i valori delle rigidità efficaci medie dei campioni di solaio e delle efficienze delle connessioni, tutti ricavati in corrispondenza del carico di esercizio, al fine di un confronto immediato tra le prestazioni delle connessioni sottoposte a sperimentazione. Si deve osservare che la rigidità efficace è stata valutata, nei diagrammi carico-spostamento, come la pendenza della retta secante in corrispondenza del carico di esercizio pari a  $6.1 \text{ kN/m}^2$ , somma del carico fisso ( $4.1 \text{ kN/m}^2$ ) e di quello variabile ( $2.0 \text{ kN/m}^2$ ).

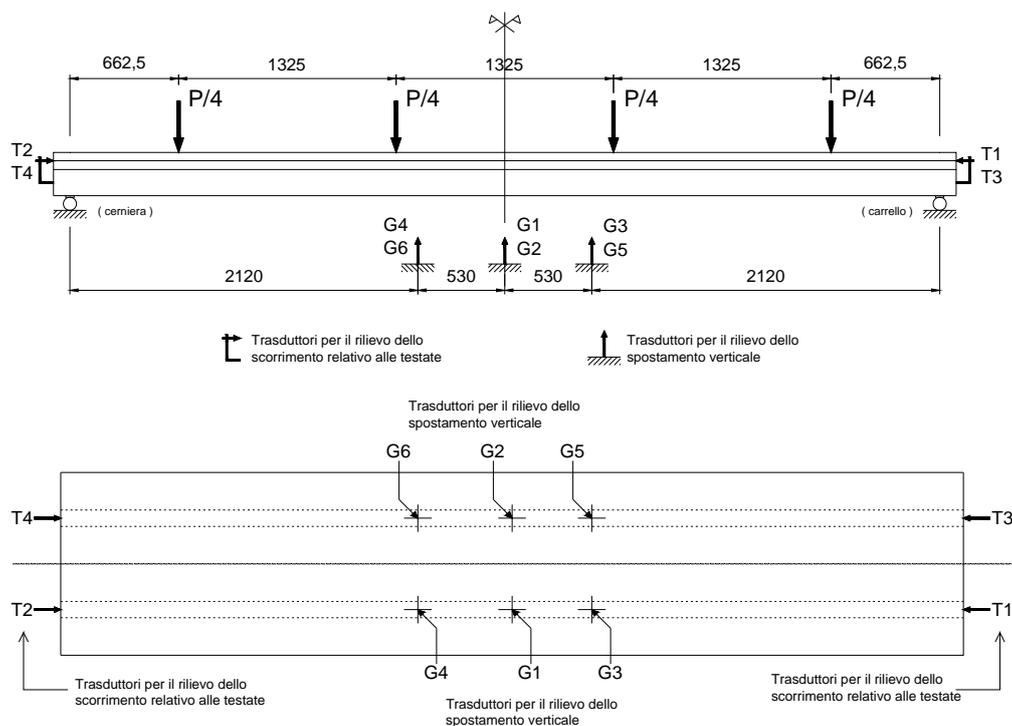
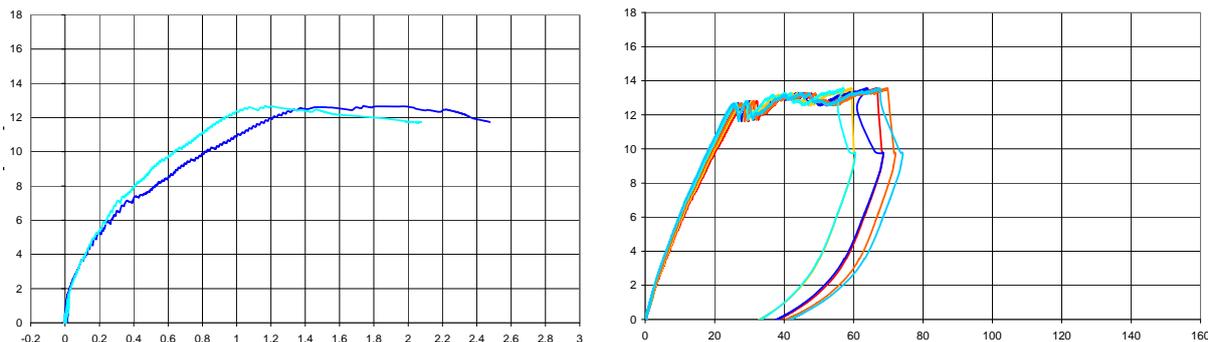


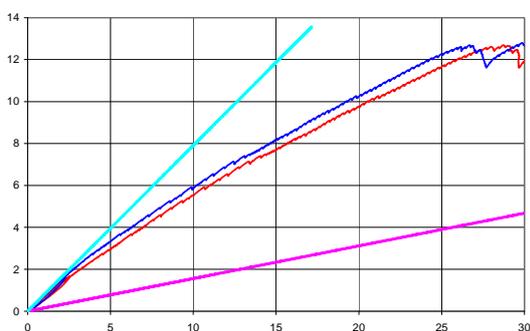
Fig. 11 Schema delle prove di carico a flessione e posizione della strumentazione.



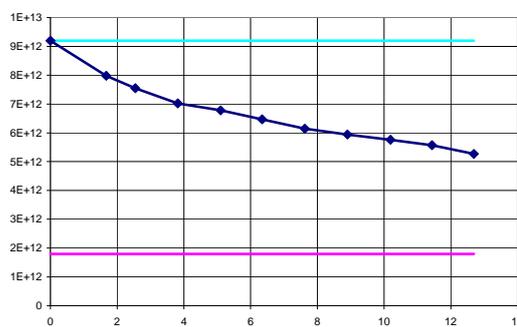
Fig. 12 Apparato di prova e tipica rottura di una delle travi lamellari (provino S15M1a).



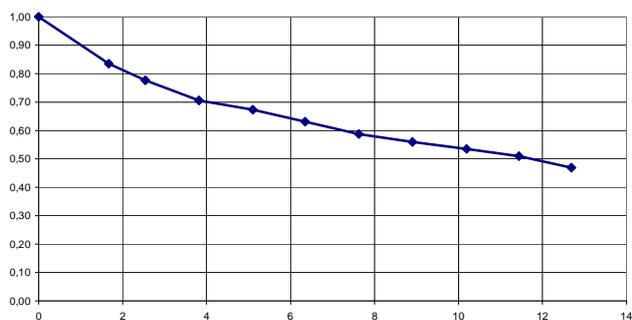
**Fig. 13** Campione S15M1a: (a) diagramma carico ( $\text{kN/m}^2$ ) – scorrimento (mm), trasduttori T2 e T4; (b) diagramma carico ( $\text{kN/m}^2$ ) – spostamento verticale (mm), trasduttori G1 – G6 (ai valori di carico indicati va sommato il peso delle travi di ripartizione pari a  $0.8 \text{ kN/m}^2$ ).



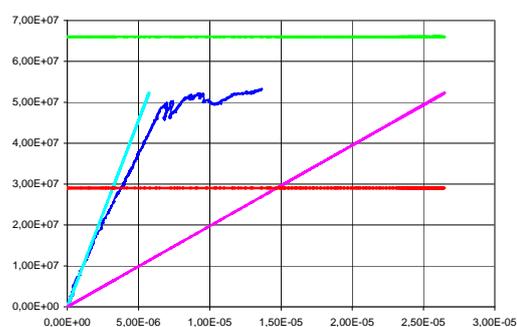
**Fig. 14** Diagrammi carico ( $\text{kN/m}^2$ ) – freccia (mm) (trasduttori G1 e G2) e confronto con i casi limite di rigidezza della connessione nulla ed infinita (campione S15M1a).



**Fig. 15** Rigidezza efficace ( $\text{N}\cdot\text{mm}^2$ ) in funzione del carico ( $\text{kN/m}^2$ ) e confronto con i casi limite di rigidezza della connessione nulla ed infinita (campione S15M1a).



**Fig. 16** Efficienza della connessione in funzione del carico ( $\text{kN/m}^2$ ) (campione S15M1a)



**Fig. 17** Diagramma momento ( $\text{N}\cdot\text{mm}$ ) – curvatura ( $1/\text{mm}$ ) e confronto con i casi limite di rigidezza della connessione nulla ed infinita (campione S15M1a)

**Tab. 4** Rigidezze efficaci e efficienze medie della connessione al valore del carico di esercizio.

Provino	Rigidezza ( $\text{N}\cdot\text{mm}^2$ )	Efficienza connessione
S10M1	$8.03 \cdot 10^{12}$	0.88
S10M2	$7.30 \cdot 10^{12}$	0.80
S15M1	$8.25 \cdot 10^{12}$	0.91
S15M2	$7.23 \cdot 10^{12}$	0.79

## 6 CONCLUSIONI

La particolare connessione legno-calcestruzzo descritta è stata sperimentata e ottimizzata in fasi successive, mediante prove sperimentali e modellazione numerica. In una prima estesa campagna sperimentale sono state prese in considerazione diverse soluzioni al fine di valutare l'influenza dei vari parametri sul comportamento statico del sistema composto. Successivamente, l'attenzione si è concentrata sulla soluzione ritenuta ottimale dal punto di vista statico, tecnologico, economico.

L'indagine ha messo in evidenza come la connessione proposta risulti molto efficiente, potendo contare su un comportamento di prima fase particolarmente rigido ma senza che ciò vada a scapito di una fase post-elastica assai pronunciata e caratterizzata da buone riserve di duttilità. Ciò è, in buona sostanza, da ascrivere alla transizione tra un comportamento di prima fase dominato dalla aderenza tra materiali e quello di seconda fase caratterizzato da pronunciate deformazioni pseudo-plastiche a compressione dei denti di legno che intervengono prima della rottura definitiva dei medesimi denti. La lunghezza relativa dei denti di legno e calcestruzzo è stata infatti ottimizzata, sulla base dell'indagine numerica, proprio per ottenere tale interessante comportamento senza che intervengano prima rotture fragili (lato calcestruzzo o lato legno): tale comportamento è stato puntualmente verificato, durante la sperimentazione, sia mediante le prove elementari sia tramite le prove a scala reale sui solai.

Le numerose prove sperimentali condotte sui solai hanno infine dimostrato, stante la limitata altezza dell'elemento ligneo utilizzato in rapporto alla luce del solaio, che la connessione è essenziale per garantire la portata al solaio composto. La cosiddetta efficienza della connessione in esercizio è assai elevata, sempre superiore a 0.75: conseguentemente si evidenzia un comportamento che, fino al limite di esercizio, è assai prossimo a quello di un solaio composto a connessione rigida.

La sperimentazione, supportata anche da un'accurata modellazione numerica, ha confermato quindi un comportamento affidabile del sistema, fornendo per la connessione valori di rigidezza e resistenza adeguati alle prestazioni richieste e in piena sintonia con quanto inizialmente ipotizzato. La tipologia di struttura composta presentata trova applicazione sicuramente nella costruzione di solai e coperture nel settore civile, ma non sono da escludere ulteriori e differenti applicazioni in ambiti diversi.

## RINGRAZIAMENTI

Le attività qui descritte sono state svolte nell'ambito di un progetto di ricerca sviluppato dalla Coperlegno s.r.l. di Roma in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale dell'Università degli Studi di Trento e l'ENEA (Ente per la Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente) e con un parziale contributo del progetto Dipartimento Protezione Civile - ReLUIS (Rete Laboratori Universitari Ingegneria Sismica), nell'ambito della linea di ricerca 1, task 3a "Solai, volte e coperture".

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Piazza M., Tomasi R., Modena R., *Strutture in legno*. Ulrico Hoepli Editore, Milano, 2005
- [2] CNR DT 206/2007, *Istruzioni per il progetto, l'esecuzione ed il controllo delle strutture di legno*, Commissione di studio e consultiva per le norme tecniche relative alle costruzioni, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, 2007
- [3] UNI EN 26891, *Strutture di legno – Assemblaggi realizzati tramite elementi meccanici di collegamento – Principi generali per la determinazione delle caratteristiche di resistenza e di deformabilità*, CEN – Comitato Europeo di Normazione, Bruxelles, 1991
- [4] Gutkowsky R., Brown K., Shigidi A., Natterer J., "Investigation of Notched Composite Wood-Concrete Connections", ASCE, 130 (10), 2004
- [5] Piazza M., Ballerini M., "Tecniche di realizzazione di solai composti in legno e calcestruzzo", in *Tecnologie avanzate nell'impiego strutturale del legno*, IX LIGNOMEC, CNR-ITL, 1999: 133-151
- [6] Ballerini M., Crocetti R., Piazza M., "An experimental investigation on notched connections for timber-concrete composite structures", Proc. 7<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering WCTE 2002, Shah Alam, Selangor Darul Ehsan, Malaysia, CD-ROM, 2002
- [7] UNI EN 1194, *Strutture di legno – Legno lamellare incollato - Classi di resistenza e determinazione dei valori caratteristici*, CEN – Comitato Europeo di Normazione, Bruxelles, 1999
- [8] UNI EN 1995-1-1, *Eurocodice 5 – Progettazione delle strutture di legno - Parte 1-1: Regole generali - Regole comuni e regole per gli edifici*, CEN – Comitato Europeo di Normazione, Bruxelles, 2004