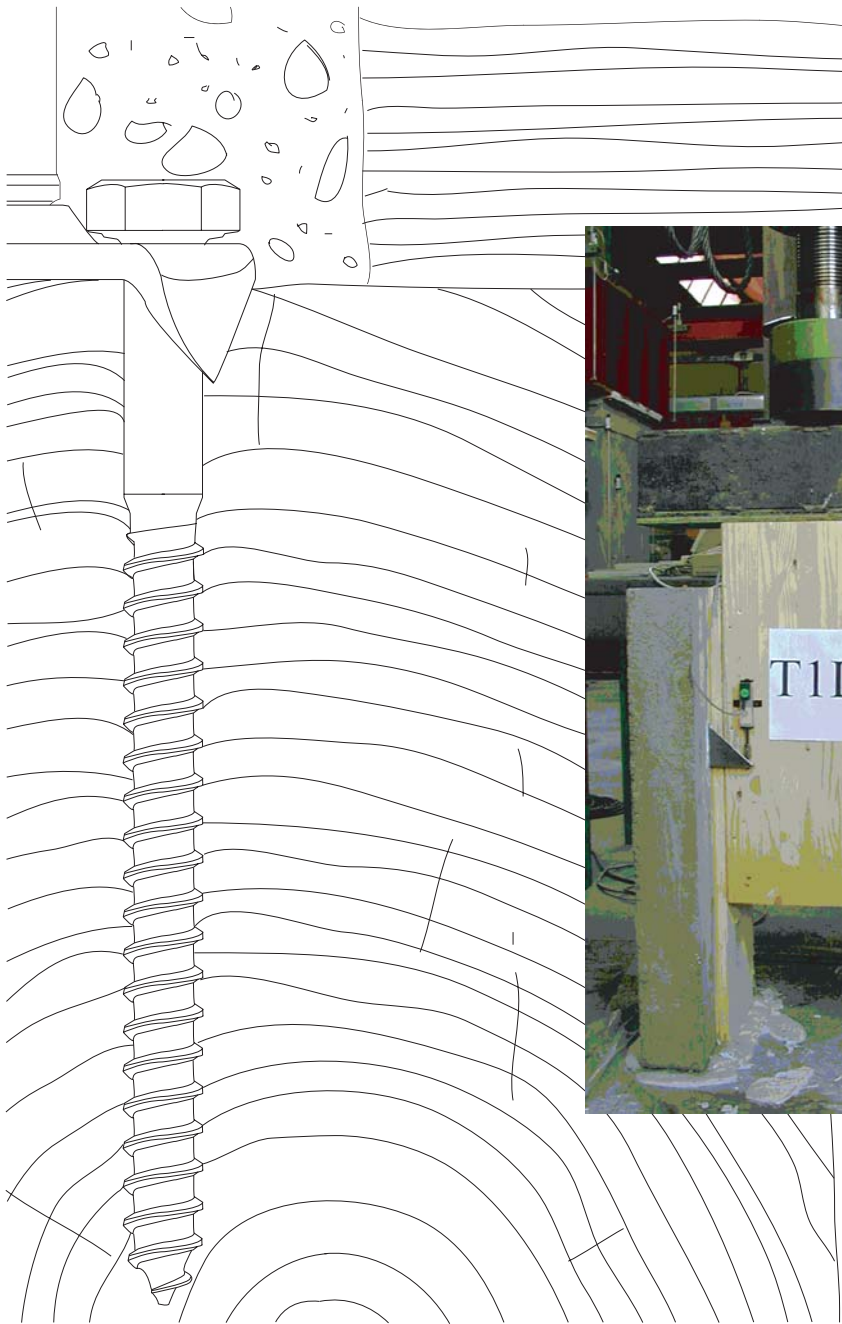


Comportamento a collasso ed in esercizio di una connessione a piolo per strutture composte legno-calcestruzzo



www.UNITS.it
Università degli Studi di Trieste

proff. ingg. MASSIMO FRAGIACOMO - CLAUDIO AMADIO - LORENZO MACORINI



TECNARIA®

COMPORTAMENTO A COLLASSO ED IN ESERCIZIO DI UNA CONNESSIONE A PIOLO PER STRUTTURE COMPOSTE LEGNO-CALCESTRUZZO

MASSIMO FRAGIACOMO, *Università di Trieste*
CLAUDIO AMADIO, *Università di Trieste*
LORENZO MACORINI, *Università di Trieste*

SUMMARY

The paper presents results of an experimental test performed on a shear stud type connection system, manufactured by the Tecnaria Spa, used for timber-concrete composite beams. Some push-out specimens constructed using both normal weight (NW) and light weight (LW) concrete were subject to creep and collapse tests. Creep tests were carried out in constant and variable environmental conditions under cycles of relative humidity with different amplitude. It was found that the connector exhibits good strength and stiffness in the collapse test. Delayed (creep) deformations take place mainly during the first days after loading in the case of constant environmental conditions. Long period (from two months to one week) cycles of relative humidity cause additional delayed deformations (the so-called mechano-sorptive effect) due to behaviour of timber around the connector, whereas short period (one day) cycles produce negligible effects. The use of LW concrete instead of NW concrete was found not to significantly affect the performance of the connection system.

1. INTRODUZIONE

La tecnica di connettere una trave in legno, massiccio o lamellare, con una soletta in calcestruzzo, normale o alleggerito, è ormai divenuta di uso comune in molti paesi del mondo. I vantaggi più evidenti sono [1]:

- la possibilità di conservare la struttura originaria in legno, ottenendo per contro un notevole incremento della rigidità e del carico ultimo del solaio;
- la creazione di un diaframma rigido di piano, essenziale per garantire un idoneo comportamento sismico dell'edificio;
- un generale miglioramento delle prestazioni acustiche, termiche ed antincendio del solaio.

Da un punto di vista statico, nelle travi composte legno-calcestruzzo è ottimizzato il comportamento dei materiali impiegati, con il legno disposto nella parte inferiore della sezione prevalentemente teso ed inflesso, il calcestruzzo disposto nella parte superiore prevalentemente compresso, ed il sistema di connessione soggetto a taglio. Ovviamente, al fine di migliorare il comportamento flessionale della trave composta, è necessario utilizzare un sistema di connessione opportunamente rigido e resistente, tale cioè da limitare lo scorrimento relativo tra la trave in legno e la soletta in calcestruzzo, e da resistere agli sforzi di taglio che si producono in condizioni ultime. Sono stati prodotti e commercializzati svariati sistemi di connessione [1,2]. Molto usati sono i sistemi cosiddetti "a secco", generalmente costituiti da viti, perni, barre o spinotti avvitati o infissi nel legno tramite un preforo, il cui vantaggio economico è legato alla possibilità di non utilizzare alcuna colla per il collegamento con il legno [3,4]. Tra questi vi è il sistema di connessione sviluppato dall'Impresa Tecnaria Spa (<http://www.tecnaria.com>), costituito da un piolo di diametro 12 mm saldato su una piastra di acciaio quadrata 50x50 mm e spessore 4 mm con angoli ripiegati a formare dei "ramponi" che affondano nel legno per circa 7 mm (Fig. 1). Il fissaggio alla trave in legno avviene mediante due viti di diametro 8 mm e lunghezza 110 mm.

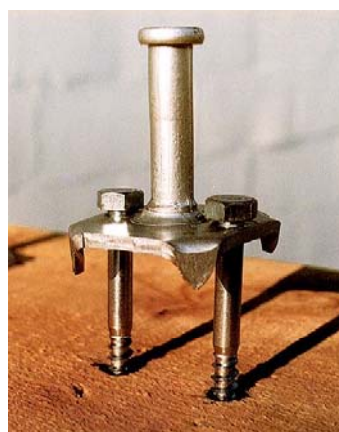


Figura 1. Connettore "Tecnaria".



Figura 2. Prova di push-out.

Secondo quanto prescritto dalle moderne normative [1,5,6], la verifica delle strutture composte legno-calcestruzzo deve essere effettuata nei riguardi degli stati limite ultimi (SLU) e di esercizio (SLE), che nel caso di solai inflessi consiste, rispettivamente, nella verifica a collasso dei materiali componenti (soletta in calcestruzzo, trave in legno, e sistema di connessione) e nel

controllo della freccia, a breve (sotto la combinazione rara) ed a lungo termine (sotto la combinazione quasi permanente dei carichi). Ne discende perciò che l'efficacia di un sistema di connessione deve essere valutata con riguardo sia alla resistenza, che interviene nelle verifiche agli SLU, che alla rigidità agli sforzi di taglio, che interviene sia nelle verifiche agli SLU che agli SLE. In particolare, poiché il controllo della freccia deve essere effettuato anche a lungo termine, cioè considerando anche gli scorrimenti viscosi ed i fenomeni di ritiro e rigonfiamento che avvengono nei materiali componenti la trave composta, è opportuno investigare anche il comportamento viscoso della connessione. A fronte di svariate indagini sperimentali, mirate alla caratterizzazione del comportamento a collasso a breve termine [2,7], pochi studi sono stati finora effettuati per valutare il comportamento viscoso dei sistemi di connessione [4,8,9,10]. In tutti i lavori, gli autori riconoscono un comportamento viscoso da parte della connessione, peraltro influenzato dall'umidità relativa ambientale.

Il presente articolo riporta i risultati finali dell'indagine sperimentale effettuata sul sistema di connessione Tecnarìa presso il Laboratorio Prove sui Materiali del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Trieste. Il comportamento del connettore è stato completamente caratterizzato con riguardo sia alla resistenza/rigidità a taglio in prove di collasso, che al comportamento viscoso in condizioni climatiche costanti e variabili, sotto cicli di umidità relativa ambientale di diverso periodo. I risultati sono stati rielaborati statisticamente in modo da fornire i valori medi e caratteristici delle principali quantità che influenzano la progettazione delle strutture composte, inclusi i coefficienti di viscosità.

2. PROGRAMMA DI PROVA

La campagna di prove sperimentali sulla connessione Tecnarìa ha interessato 18 provini di push-out, dei quali metà realizzati con soletta in calcestruzzo normale (NC) di classe C20/25 in accordo all'Eurocodice 2, Parte 1-1 [11], e l'altra metà con soletta in calcestruzzo alleggerito (LC) di classe LC9/11 in accordo all'Eurocodice 2, Parte 1-4 [11]. Tale calcestruzzo è stato ottenuto miscelando argilla espansa, sabbia naturale, cemento di classe 42.5, acqua ed additivo superfluidificante. La ridotta resistenza del LC non inficia la validità delle prove, dal momento che rottura si è sempre manifestata sul lato della trave

in legno. Due connettori Tecnarìa per lato collegano la trave in legno lamellare incollato, di classe GL28h in accordo alla norma prEN 1194 [12], alle due solette in calcestruzzo, gettate sopra un tavolato interrotto in prossimità della trave in legno. All'interno delle solette è sistemata una rete elettrosaldata ϕ 6 mm con maglia 10x10 cm. In Fig. 2 è rappresentato il provino inserito nella pressa durante l'esecuzione delle prove di collasso, mentre in Fig. 3 sono indicate le dimensioni del provino assieme all'apparato di prova messo a punto per lo svolgimento delle prove di viscosità a carico costante.

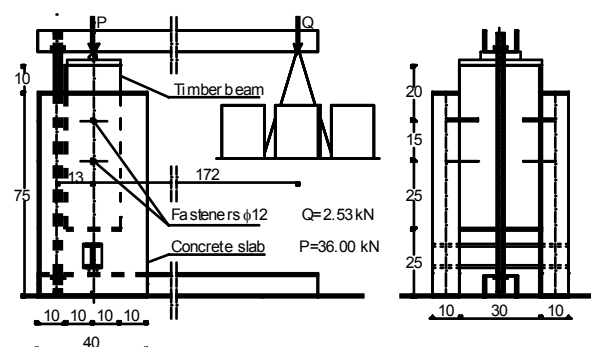


Figura 3. Dimensioni dei provini di push-out e rappresentazione dell'apparato a leva utilizzato per le prove di viscosità (quote in cm).

Le prove si sono svolte secondo il seguente ordine temporale:

- prova di collasso a breve termine su sei provini (tre con soletta in NC e tre con soletta in LC), al fine di valutare resistenza e rigidità;
- prova di viscosità (a carico costante) in condizioni ambientali costanti su dodici provini diversi dai precedenti (sei con soletta in NC e sei con soletta in LC), al fine di valutare il coefficiente di viscosità;
- prova di viscosità (a carico costante) sugli stessi provini in condizioni ambientali variabili, considerando cicli di umidità relativa ambientale di periodo diverso, al fine di valutare l'incremento di deformazione differita dovuto alla variazione di umidità;
- scarico dei provini in condizioni ambientali costanti, al fine di misurare il recupero viscoso;
- prova di collasso finale a breve termine su tutti e dodici i provini precedentemente soggetti alle prove a lungo termine, al fine di valutare resistenza e rigidità, e l'eventuale influenza della storia precedente di carico su tali quantità.

3. PROVE DI COLLASSO

Le prove di collasso sono state eseguite in due fasi:

- prima delle prove di viscosità, su tre provini con soletta in NC e tre con soletta in LC;
- dopo le prove di viscosità, della durata complessiva di 720 giorni, su sei provini con soletta in NC e sei con soletta in LC.

Le prove sono state condotte applicando il carico mediante un martinetto da 600 kN collegato ad un misuratore idraulico a pendolo. Gli scorrimenti relativi tra trave in legno e soletta in calcestruzzo sono stati misurati mediante quattro trasduttori rettilinei di spostamento di escursione 25 mm posizionati ai quattro angoli del provino (Fig. 2), dei quali è stata poi calcolato il valore medio al variare del carico. Durante la seconda fase, le prove sono state condotte su tutti i provini in conformità alla procedura prevista dalla norma UNI EN 26891 [13], che prevede un ciclo di carico e scarico prima di pervenire al collasso. Tutti i risultati delle prove sono stati elaborati in accordo alla predetta norma. L'umidità media del legno, nelle prove di collasso, è risultata pari allo 10.5 %.

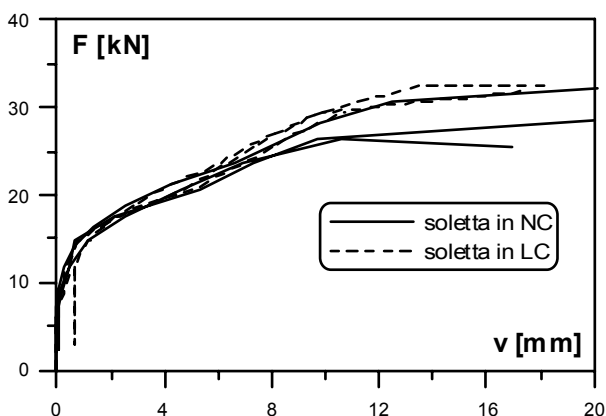


Figura 4. Legame forza di taglio-scorrimento relativo registrato nelle prove di collasso preliminari.

3.1. PROVE DI COLLASSO PRELIMINARI

In Fig. 4 sono riportate le curve forza di taglio-scorrimento relativo tra trave in legno e soletta in calcestruzzo registrate durante le prove di collasso preliminari, effettuate prima delle prove di viscosità. I risultati delle prove, elaborati in accordo alla norma UNI EN 26891 [13], sono riportati in Tab. 1. Le quantità F , k , v , rappresentano, rispettivamente, lo sforzo di taglio, la rigidezza e lo scorrimento relativo per ciascun

connettore. I valori statistici (minimo-MIN, massimo-MAX, medio-AVE e deviazione standard-STDV) valutati separatamente per i provini con soletta in NC e LC, e complessivamente su tutti i provini (NC+LC) sono riportati in Tab. 2 per lo sforzo di taglio di collasso F_{max} e per le rigidezze secanti a diversi valori del carico k_i , k_s , $k_{0,6}$ e $k_{0,8}$.

PROVINO	1N	2N	3N	1L	2L	3L
F_{max} [kN]	31.1	27.5	26.5	29.4	31.0	32.4
F_{est} [kN]	23.5	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4
v_i [mm]	0.376	0.383	0.331	0.384	0.584	0.575
$v_{i,mod}$ [mm]	0.497	0.510	0.442	0.508	0.776	0.762
v_s [mm]	-0.121	-0.128	-0.110	-0.123	-0.192	-0.187
v_e [mm]	-	-	-	-	0.024	-
k_i [N/mm]	33049	28793	31962	30646	20171	22535
k_s [N/mm]	25013	21595	23971	23191	15172	17002
$k_{0,6}$ [mm]	2.415	1.541	1.743	2.306	2.746	3.731
$v_{0,6,mod}$ [mm]	-	-	-	-	2.855	-
$k_{0,6}$ [N/mm]	7726	10720	9115	7657	6517	5206
$v_{0,8}$ [mm]	7.427	6.299	5.129	6.939	5.969	7.567
$v_{0,8,mod}$ [mm]	-	-	-	-	6.078	-
$k_{0,8}$ [N/mm]	3349	3497	4131	3393	3944	3422

Tabella 1. Risultati delle prove di collasso preliminari (N/L: soletta in calcestruzzo normale/alleggerito).

	F_{max} [kN]	k_i [N/mm]	k_s [N/mm]	$k_{0,6}$ [N/mm]	$k_{0,8}$ [N/mm]
MIN (NC)	26.5	28793	21595	7726	3349
MAX (NC)	31.1	33049	25013	10720	4131
AVE (NC)	28.4	31268	23526	9187	3659
STDV (NC)	2.4	2211	1752	1498	416
MIN (LC)	29.4	20171	15172	5206	3393
MAX (LC)	32.4	30646	23191	7657	3944
AVE (LC)	30.9	24451	18455	6460	3587
STDV (LC)	1.5	5494	4202	1226	310
MIN (NC+LC)	26.5	20171	15172	5206	3349
MAX (NC+LC)	32.4	33049	25013	10720	4131
AVE (NC+LC)	29.7	27859	20991	7823	3623
STDV (NC+LC)	2.3	5289	4001	1931	330

Tabella 2. Risultati statistici delle prove di collasso preliminari valutati sui provini con soletta in NC, in LC, e su tutti i provini (NC+LC).

3.2. PROVE DI COLLASSO FINALI

In Fig. 5 sono riportate le curve forza di taglio-scorrimento relativo tra trave in legno e soletta in calcestruzzo registrate durante le prove di collasso finali, effettuate al termine delle prove di viscosità. I risultati delle prove, elaborati in accordo alla norma UNI EN 26891 [13], sono riportati in Tab. 3 e 4, rispettivamente, per i provini con soletta in NC e LC. I corrispondenti valori statistici sono riportati in Tab. 5 per le quantità F_{max} , k_i , k_s , $k_{0,6}$ e $k_{0,8}$. Nella valutazione statistica è stato escluso il provino 4N, caratterizzato da un comportamento atipico (è la curva più bassa di Fig. 5) e quindi non rappresentativo.

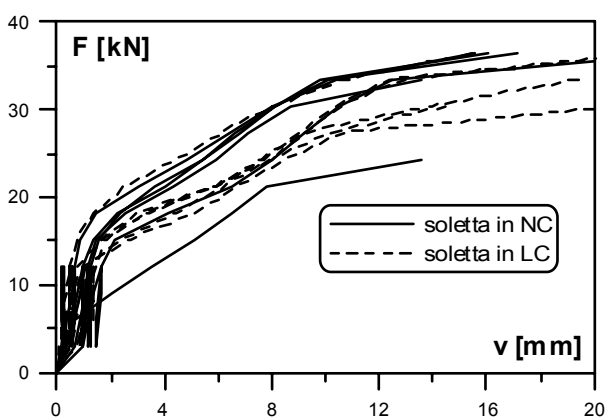


Figura 5. Legame forza di taglio-scorrimento relativo registrato nelle prove di collasso finali.

PROVINO	4N	5N	6N	7N	8N	9N
F_{max} [kN]	24.3	36.2	33.5	35.6	36.0	34.1
F_{est} [kN]	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4
v_i [mm]	0.252	0.674	1.086	0.963	1.224	1.607
$v_{i,mod}$ [mm]	0.155	0.565	0.872	0.810	0.706	0.914
v_s [mm]	0.097	0.109	0.214	0.153	0.518	0.693
v_e [mm]	2.117	0.165	0.190	0.125	0.181	0.281
k_i [N/mm]	48318	18053	11202	12633	9940	7570
k_e [N/mm]	78427	21533	13948	15022	17227	13309
$v_{0,6}$ [mm]	7.032	3.283	3.652	4.097	3.804	5.887
$v_{0,6,mod}$ [mm]	1.402	3.141	3.379	3.895	3.236	5.132
$k_{0,6}$ [N/mm]	13015	5808	5400	4685	5639	3556
$v_{0,8}$ [mm]	7.032	7.236	6.876	7.182	8.757	9.130
$v_{0,8,mod}$ [mm]	3.615	7.094	6.603	6.980	8.189	8.374
$k_{0,8}$ [N/mm]	6731	3430	3684	3485	2971	2905

Tabella 3. Risultati delle prove di collasso finali sui provini con soletta in NC.

PROVINO	4L	5L	6L	7L	8L	9L
F_{max} [kN]	36.1	30.4	31.0	28.6	34.2	34.1
F_{est} [kN]	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4
v_i [mm]	0.484	0.550	0.526	0.632	1.361	1.080
$v_{i,mod}$ [mm]	0.481	0.489	0.440	0.509	0.863	0.715
v_s [mm]	0.003	0.062	0.086	0.123	0.497	0.364
v_e [mm]	0.133	0.398	0.295	0.285	0.256	0.228
k_i [N/mm]	25118	22100	23133	19253	8940	11267
k_e [N/mm]	25271	24901	27668	23888	14092	17007
$v_{0,6}$ [mm]	2.779	4.460	3.746	4.288	5.251	5.135
$v_{0,6,mod}$ [mm]	2.743	3.967	3.376	3.792	4.688	4.696
$k_{0,6}$ [N/mm]	6652	4600	5406	4812	3892	3886
$v_{0,8}$ [mm]	7.077	7.960	7.817	7.666	9.062	9.173
$v_{0,8,mod}$ [mm]	7.041	7.468	7.446	7.170	8.499	8.734
$k_{0,8}$ [N/mm]	3455	3258	3267	3393	2863	2785

Tabella 4. Risultati delle prove di collasso finali sui provini con soletta in LC.

	F_{max} [kN]	k_i [N/mm]	k_e [N/mm]	$k_{0,6}$ [N/mm]	$k_{0,8}$ [N/mm]
MIN (NC)	33.5	7570	13309	3556	2905
MAX (NC)	36.2	18053	21533	5808	3684
AVE (NC)	35.1	11880	16208	5018	3295
STDV (NC)	1.2	3920	3328	923	340
MIN (LC)	28.6	8940	14092	3886	2785
MAX (LC)	36.1	25118	27668	6652	3455
AVE (LC)	32.4	18302	22138	4875	3170
STDV (LC)	2.8	6668	5332	1045	280
MIN (NC+LC)	28.6	7570	13309	3556	2785
MAX (NC+LC)	36.2	25118	27668	6652	3684
AVE (NC+LC)	33.6	15383	19442	4940	3227
STDV (NC+LC)	2.6	6295	5314	945	299

Tabella 5. Risultati statistici delle prove di collasso finali valutati sui provini con soletta in NC, in LC, e su tutti i provini (NC+LC).

3.3. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Dall'esame dei risultati ottenuti, si può osservare quanto segue.

- La connessione Tecnarìa esibisce un comportamento molto rigido, con scorrimenti molto limitati, per bassi valori della forza di taglio ($F < 0.2F_{max}$), grazie al contributo offerto dai ramponi della piastra di fissaggio (Fig. 1). Ciò è particolarmente evidente nelle prove preliminari di collasso (Fig. 4). All'aumentare del carico, si verificano degli scorrimenti

maggiori con una riduzione della rigidità, fino al collasso che avviene sul lato del legno per estrazione delle viti.

- Il tipo di calcestruzzo della soletta non influenza sensibilmente il comportamento della connessione, né con riferimento al carico di collasso, né con riferimento alla rigidità, che in entrambe le prove di collasso (Tab. 2 e 5) non differiscono in maniera rilevante. Ciò è in accordo col fatto che sia il collasso che la deformabilità del sistema dipendono prevalentemente dalle caratteristiche della trave in legno.
- Non si riscontra una sensibile dipendenza del carico di collasso dalla storia di carico precedente. La rigidità risulta invece inferiore (soprattutto nei valori di rigidità iniziale k_i) per i provini precedentemente sottoposti alla prova di viscosità.

	F_{max} [kN]	k_i [N/mm]	k_s [N/mm]	$k_{0,6}$ [N/mm]	$k_{0,8}$ [N/mm]
Minimo	26.49	7570	13309	3556	2785
Massimo	36.20	25118	27668	10720	4131
Media	32.2	15383	19989	5957	3367
Deviaz. stand.	3.1	6295	4820	1934	358
Frattile 5%-Norm	27.2	5059	12065	2777	2778
Frattile 5%-Log	28.4	5352	11576	2710	2878

Tabella 6. Risultati statistici finali delle prove di collasso eseguiti sulla connessione Tecnaria

- Alla luce delle considerazioni di cui sopra, i valori medio e caratteristico del carico di collasso e delle rigidità sono stati determinati con riferimento alla popolazione dei risultati ottenuti da entrambe le prove di collasso (preliminari e finali), al solito scartando il provino anomalo N4, senza distinzione tra NC e LC. Solo per la rigidità iniziale k_i si è fatto riferimento, in favore di sicurezza, ai risultati delle prove di collasso finali. In Tab. 6 sono riportati i valori così calcolati, inclusi i valori caratteristici (frattili 5%) determinati secondo una distribuzione normale e lognormale, come previsto dall'Eurocodice 5 [5]. In grassetto sono rappresentati il valore caratteristico del carico di collasso del connettore ed i valori medi delle rigidità secanti k_s e $k_{0,6}$. Tali quantità sono utilizzate, rispettivamente, per la verifica allo stato limite ultimo della connessione, e per il calcolo della ripartizione degli sforzi tra soletta e trave in legno nelle verifiche allo stato limite di esercizio ed ultimo, in accordo

alla procedura di verifica suggerita da Ceccotti [1].

- Il legame costitutivo della connessione può essere rappresentato mediante la legge di Ollgard [14]:

$$F = F_{max}(1 - e^{-\beta v})^\alpha \quad (1)$$

valida per $v < 15$ mm, assumendo $F_{max} = 77.3$ kN, $\alpha = 0.3408$, e $\beta = 0.00558$ mm⁻¹. Tali valori sono stati ottenuti interpolando i risultati delle prove sperimentali depurati dei cidi di carico e scarico preliminari.

4. PROVE DI VISCOSITA'

Le prove di viscosità si sono svolte dal giorno 13 giugno 2000 al giorno 3 giugno 2002 in tre fasi:

- prova di viscosità (a carico costante) in condizioni ambientali costanti;
- prova di viscosità (a carico costante) in condizioni ambientali variabili,
- scarico dei provini in condizioni ambientali costanti.

Le prove sono state condotte su dodici provini di push-out (sei con soletta in NC e sei con soletta in LC) applicando il carico mediante il meccanismo a leva di Fig. 3. Mediante tale meccanismo, sul provino è stato applicato un carico Q costante nel tempo pari al 30% del carico di rottura ottenuto dalle prove preliminari di collasso. Tale aliquota corrisponde al livello di carico che può essere presente nella connessione per una combinazione di carico intermedia tra quella frequente e quella quasi-permanente.



Figura 6. Fotografia dei provini disposti nella camera climatica durante la prova di viscosità.

I provini sono stati sistemati in una camera climatica (Fig. 6) nella quale la temperatura è stata mantenuta al valore costante di 24°C durante tutta la durata della prova. Gli scorrimenti relativi tra legno e soletta sono stati rilevati automaticamente, per ciascun provino, mediante quattro trasduttori lineari di spostamento di tipo resistivo con precisione 0.01 mm, calcolando poi il valor medio. Il contenuto di umidità della trave in legno è stato rilevato manualmente mediante un igrometro elettrico a conducibilità su quattro provini alle profondità di 5, 45 e 60 mm.

4.1. PROVA IN CONDIZIONI AMBIENTALI COSTANTI

La prova è stata condotta per 103 giorni in camera climatica in condizioni di umidità relativa ambientale costante pari a RH=70%. Tre provini (due con soletta in NC ed uno con soletta in LC) hanno subito un ciclo di carico e scarico al 30% del carico medio di collasso prima dell'inizio della prova di viscosità, al fine di stabilire eventuali influenze sulla funzione di viscosità della connessione. Le curve sperimentali ottenute sono riportate in Fig. 7 in termini di coefficiente di viscosità φ dato da:

$$\varphi(t, t_0) = [v(t) - v(t_0)] / v(t_0) \quad (2)$$

dove v è lo scorrimento relativo tra soletta e trave in legno, t e t_0 sono gli istanti corrente e di applicazione del carico. Nonostante la dispersione dei risultati piuttosto marcata appare chiaro come la connessione dimostri un comportamento viscoso. Due provini, quelli individuati dalle curve più bassa e più alta, sono caratterizzati da comportamenti anomali (scorrimenti elastici molto bassi). I provini caricati prima dimostrano un'evoluzione del coefficiente di viscosità leggermente diversa dagli altri, più graduale, anche se tutte le curve tendono a stabilizzarsi su un asintoto quasi orizzontale a partire dal 40° giorno. Non si è riscontrata alcuna differenza sostanziale tra i provini con soletta in NC e quelli con soletta in LC. Il coefficiente di viscosità medio, ottenuto sui sei provini che hanno dimostrato il comportamento più omogeneo, può essere approssimato mediante il modello reologico generalizzato di Kelvin:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi(t_0) + \sum J_i [1 - \exp(-(t - t_0) / \tau_i)] \quad (3)$$

con i coefficienti τ_i e J_i pari, nel caso di due catene di Kelvin, a: $\tau_1 = 0.0677$ giorni, $J_1 = 0.1631$,

$\tau_2 = 2.9004$ giorni, $J_2 = 0.3245$. Nonostante il livello di carico piuttosto elevato al quale sono stati sottoposti i provini, il coefficiente di viscosità medio per tempi elevati è comunque piuttosto contenuto (in media vale 0.5), se confrontato ad esempio con i valori del calcestruzzo.

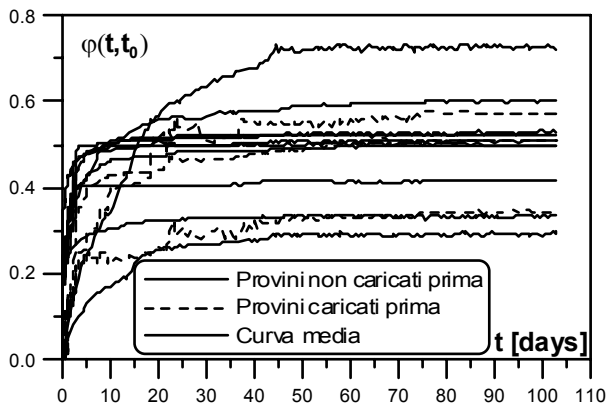


Figura 7. Andamento nel tempo del coefficiente di viscosità nella prova in condizioni ambientali costanti.

4.2. PROVA IN CONDIZIONI AMBIENTALI VARIABILI

La prova è stata condotta in camera climatica sottoponendo i provini a cicli caratterizzati da intervalli di tempo T ad umidità relativa ambientale RH=50% alternati ad intervalli T a RH=90%. Si possono considerare due fasi di prova:

- una prima fase, di durata 470 giorni, durante la quale sono stati applicati 8 cicli di periodo $2T$ pari a 14 giorni seguiti da 3 cicli di periodo $2T$ di 56 giorni, con alla fine un periodo di tempo di 70 giorni ad RH costante pari a 50% (fig. 8);
- una seconda fase, di durata 37 giorni, durante la quale sono stati applicati 5 cicli di periodo $2T$ pari a 7 giorni seguiti da 3 cicli periodo $2T$ pari ad 1 giorno (fig. 9).

Tra le due fasi di prova è intercorso un periodo di tempo di durata 169 giorni durante il quale sono state sospese le misurazioni degli scorrimenti e l'ambiente non è stato condizionato ad un valore prefissato di umidità relativa.

I risultati delle misurazioni effettuate durante la prima fase in condizioni ambientali variabili hanno evidenziato una notevole dispersione dei risultati. Alcuni provini hanno mostrato degli incrementi molto alti di scorrimento, mentre altri si sono dimostrati quasi insensibili ai cicli di umidità. Tra questi, due provini sono stati scaricati dopo 313 giorni. In tal modo si è voluto ottenere qualche

informazione sul recupero elastico in condizioni ambientali variabili, e nel contempo avere a disposizione due provini scarichi ("dummy specimens") da usare come riferimento rispetto a cui valutare gli scorrimenti dei provini sotto carico nella fase successiva. In Fig. 8 sono riportate le curve dei sei provini caricati caratterizzati dal comportamento più uniforme assieme al valore medio. Gli scorrimenti differiti, dopo essersi stabilizzati durante la prova ad umidità costante, riprendono in maniera decisa per effetto dei cicli di umidità. Una riduzione di umidità comporta un incremento di scorrimento, che è maggiore per cicli di umidità relativa di periodo più grande, mentre il viceversa accade nel caso di un aumento di umidità. Dei due effetti prevale comunque il primo, a parità di variazioni di umidità, nei provini sotto carico, che pertanto dimostrano un incremento dello scorrimento relativo nel tempo. Il contrario accade, invece, nei provini scaricati. La velocità con cui evolvono gli scorrimenti tende comunque a ridursi leggermente nel tempo.

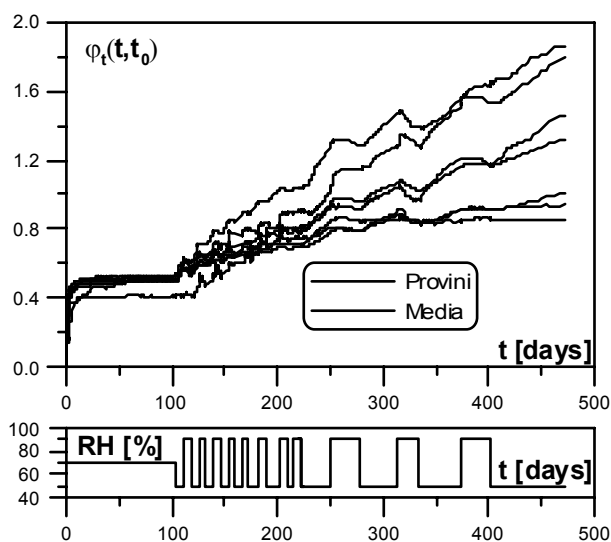


Figura 8. Andamento nel tempo del coefficiente di viscosità totale nei sei provini più rappresentativi durante la prova in condizioni ambientali costanti e la prima fase della prova in condizioni ambientali variabili.

Tutte queste caratteristiche sono tipiche del fenomeno "meccanico-assorbitivo" che si manifesta nel legno [15,16]. Si può pertanto concludere che anche nei sistemi di connessione si verifica tale effetto, che è dovuto al comportamento del legno in prossimità delle zone di contatto tra viti e trave in legno. E' possibile interpolare il valore medio del coefficiente di viscosità associato al fenomeno meccanico-

assorbitivo ϕ_{ms} mediante il modello reologico generalizzato di Kelvin (eq. 3) assumendo i seguenti parametri: $\tau_1=5.4593$ giorni, $J_1=0.0395$, $\tau_2=497.2832$ giorni, $J_2=1.4487$. Tale funzione permette di formulare una previsione numerica a tempo infinito del coefficiente ϕ_{ms} pari a 1.49.

Il contenuto di umidità nel legno nelle fibre a profondità 5 mm ha mostrato oscillazioni importanti, dell'ordine dello 0.02/0.03 in più o in meno rispetto al valore iniziale di 0.10 per, rispettivamente, i cicli di periodo $2T=14$ giorni e $2T=56$ giorni. Nelle fibre più profonde, invece, le oscillazioni si riducono allo 0.01 e dimostrano un andamento meno regolare sui diversi provini.

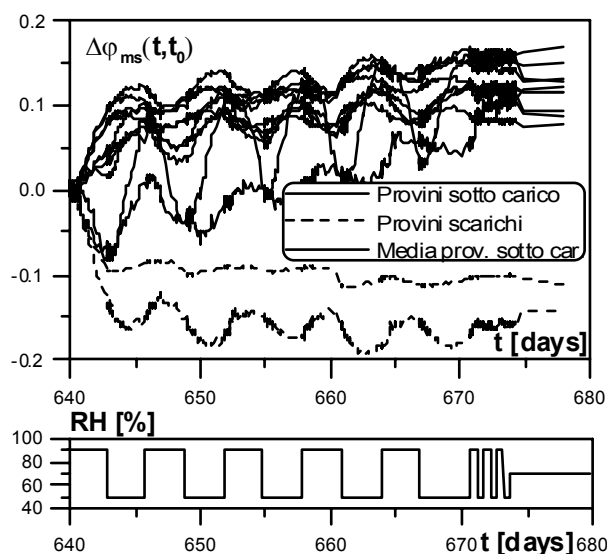


Figura 9. Andamento nel tempo dell'incremento del coefficiente di viscosità durante la seconda fase della prova in condizioni ambientali variabili.

Il risultato delle misurazioni durante la seconda fase della prova è riportato in Fig. 9 in termini di incremento del coefficiente di viscosità $\Delta\phi_{ms}$. Sono riportate anche le curve relative ai provini scarichi ("dummy specimens"), che rappresentano le oscillazioni di scorrimento relativo dovute esclusivamente agli accorciamenti/dilatazioni anelastici del legno al variare dell'umidità. Al fine di valutare il puro effetto meccanico-assorbitivo, gli scorrimenti dei provini sotto carico sono stati depurati della media degli scorrimenti monitorati nei provini scarichi. L'andamento medio dei provini sotto carico dimostra delle oscillazioni del coefficiente di viscosità dovute al fenomeno meccanico-assorbitivo. I cicli di periodo $2T=7$ giorni presentano delle oscillazioni di ampiezza inferiore a quelle registrate precedentemente durante la prima fase della prova in condizioni variabili, che

divengono trascurabili in presenza di cicli di umidità di periodo $2T=1$ giorno. Si registra un complessivo incremento del coefficiente di viscosità di circa 0.10 durante l'applicazione dei cicli settimanali, mentre i cicli giornalieri non producono alcun sensibile incremento.

4.3. SCARICO IN CONDIZIONI AMBIENTALI COSTANTI

Al termine della seconda fase della prova in condizioni ambientali variabili, i provini sono stati scaricati e si è rilevato il recupero viscoso in condizioni ambientali costanti ($RH=70\%$) per un periodo di 80 giorni. Il coefficiente di viscosità $\varphi(t, t_0)$ dato dall'eq. (2), dove t_0 rappresenta l'istante di scarico e $v(t_0)$ è lo scorrimento elastico misurato all'atto dello scarico, è rappresentato in Fig. 10 assieme al valore medio.

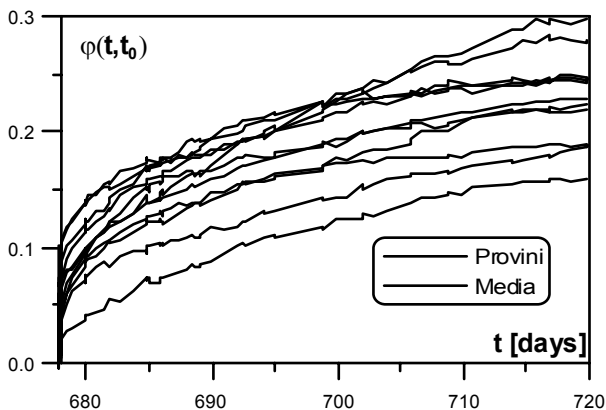


Figura 10. Andamento nel tempo del coefficiente di viscosità durante lo scarico dei provini in condizioni ambientali costanti.

Si può osservare come lo scarico viscoso avvenga più lentamente del corrispondente carico viscoso e continui oltre il periodo di monitoraggio di 80 giorni. Ne consegue pertanto che la connessione è caratterizzata, a differenza del legno, da un comportamento viscoso non lineare, nel quale lo scorrimento viscoso prodotto dall'applicazione di un certo carico viene restituito nel tempo solo parzialmente e più lentamente di quanto avviene in fase di carico. Ciò può essere giustificato sulla base del comportamento non lineare del sistema di connessione, già riscontrato nelle prove di collasso, dovuto alla plasticizzazione del legno delle zone di contatto con il connettore. Il coefficiente di viscosità medio in fase di scarico può essere approssimato mediante il modello reologico generalizzato di Kelvin (eq. 3) con i coefficienti τ_i e J_i pari, nel caso

di due catene di Kelvin, a: $\tau_1=0.0598$ giorni, $J_1=0.0783$, $\tau_2=16.8156$ giorni, $J_2=0.1621$. Tale modello conduce per tempi elevati ad un valore finale $\varphi(t, t_\infty)=0.24$, all'incirca pari a metà del valore asintotico del coefficiente di viscosità in fase di carico. E' bene comunque rilevare come questa rappresenti una pura previsione numerica, dal momento che al termine del monitoraggio dello scarico gli scorrimenti viscosi non si erano ancora esauriti.

Fase della prova	Carico viscoso	8 cicli da 14 giorni	3 cicli da 56 giorni	5 cicli da 7 giorni	3 cicli da 1 giorno	Scarico viscoso	
Inizio	13/6/00	25/9/00	22/1/01	15/3/02	15/4/02	18/4/02	
Fine	24/9/00	22/1/01	20/7/01	15/4/02	18/4/02	3/6/02	
Durata [giorni]	103.0	119.1	179.1	31.4	3.4	80.0	
Coeff. Visc.	$\Delta\varphi$	$\Delta\varphi_{ms}$	$\Delta\varphi_{ms}$	$\Delta\varphi_{ms}$	$\Delta\varphi_{ms}$	$\Delta\varphi$	
Numero Provino	4N	0.57	2.62	2.32	0.08	0.03	0.19
	5N	0.34	1.26	1.71	0.15	-0.02	0.22
	6N	0.51	0.54	0.49	0.08	0.00	0.25
	7N	0.53	0.22	0.12	0.10	-0.02	0.19
	8N	0.60	0.11	0.07	0.11	-0.02	0.28
	9N	0.72	0.80	-	-	-	-
	4L	0.51	0.39	0.74	0.15	0.00	0.25
	5L	0.50	0.19	0.22	0.12	0.00	0.25
	6L	0.52	0.19	0.20	0.14	-0.01	0.22
7L	0.41	0.37	0.39	0.14	0.01	0.30	
8L	0.30	1.54	1.65	0.09	0.00	0.16	
9L	0.33	0.53	-	-	-	-	
Media	0.49	0.32	0.29	0.12	0.00	0.24	

Tabella 7. Risultati finali delle prove di viscosità eseguiti sulla connessione Tecnaria.

4.4. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

I risultati ottenuti nelle prove di viscosità sono riassunti in Tab. 7, dove sono riportati i vari contributi al coefficiente di viscosità totale registrati durante le diverse fasi della prova al variare delle condizioni ambientali e del tipo di ciclo di umidità ambientale. I valori medi, su cui sono stati calibrati i coefficienti delle funzioni approssimanti (Eq. 3), sono stati valutati sui sei provini che hanno fornito i risultati più uniformi (provini 6N, 7N, 4L, 5L, 6L e 7L). Sulla base dei valori ottenuti, si può affermare quanto segue.

- Non si è osservata alcuna dipendenza del coefficiente di viscosità dal tipo di calcestruzzo con cui è realizzata la soletta.

- La connessione Tecnaria esibisce un comportamento viscoso, in condizioni ambientali costanti, caratterizzato da un valore finale del coefficiente di viscosità $\varphi=0.5$ sotto carico, mentre in fase di scarico il coefficiente di viscosità si riduce, con un valore finale previsto pari a circa la metà ($\varphi=0.24$).
- In presenza di cicli di umidità relativa ambientale, si produce un incremento del coefficiente di viscosità, associato al fenomeno meccanico-assorbitivo, tanto più importante quanto più lunghi, più numerosi e più ampi sono tali cicli. Le variazioni giornaliere sono praticamente prive di effetto, mentre quelle di periodo maggiore o uguale a sette giorni incrementano gli scorrimenti.
- Sulla base dei numerosi studi effettuati sul fenomeno meccanico-assorbitivo del legno [15,16], è ragionevole ritenere che l'incremento di viscosità associato ai cicli di umidità tenda ad un valore limite all'aumentare del numero ed ampiezza dei cicli. Tale valore limite, sulla base dei risultati delle prove, può essere stimato in $\varphi_{ms}=1.5$.
- Per quanto riguarda le verifiche a lungo termine delle strutture composte, il valore del coefficiente finale di viscosità della connessione φ_{tot} dovrebbe essere correlato al numero di oscillazioni di umidità (di ampiezza 40% e periodo di almeno 7 giorni) prevedibili in funzione della zona climatica e dell'esposizione della struttura. Un semplice criterio potrebbe essere quello di assumere $\varphi_{tot}=\varphi=0.5$ per strutture all'interno (classe di esposizione 1 in accordo all'Eurocodice 5 [5]) e $\varphi_{tot}=\varphi+\varphi_{ms}=2$ per strutture all'esterno (classe di esposizione 3 in accordo all'Eurocodice 5 [2]), considerando un valore intermedio nel caso della classe 2 di esposizione.
- Tale criterio approssimato porta per strutture di classe 3 di esposizione, nell'ambito del metodo del modulo efficace per la valutazione degli effetti della viscosità, a dei valori di rigidezza ridotti nelle verifiche a lungo termine pari a circa un terzo del valore della rigidezza della connessione a breve termine. Trattasi, pertanto, di un effetto non trascurabile.

5. CONCLUSIONI

La campagna di prove sperimentali effettuata sulla connessione "Tecnaria" ha interessato 18 provini, sui quali sono state effettuate sia prove di

collasso che prove di viscosità, in condizioni di umidità relativa ambientale costante e variabile. I risultati più importanti si possono così riassumere:

- l'utilizzo di solette in calcestruzzo alleggerito non influenza sensibilmente né i risultati delle prove di collasso né quelli delle prove di viscosità;
- l'applicazione di un carico sostenuto (cioè applicato per lungo tempo) sulla connessione non influenza il carico di collasso mentre riduce la rigidezza iniziale;
- il sistema di connessione dimostra un comportamento viscoso relativamente poco pronunciato in condizioni ambientali costanti, con un coefficiente finale di viscosità $\varphi=0.5$ in fase di carico e $\varphi=0.25$ in fase di scarico;
- il sistema di connessione dimostra un comportamento di tipo meccanico-assorbitivo, cioè caratterizzato da una ripresa degli scorrimenti viscosi in presenza di cicli di umidità relativa ambientale di periodo maggiore o uguale a sette giorni ed ampiezza del 40%;
- sulla base delle misurazioni effettuate, peraltro caratterizzate da un'ampia dispersione dei risultati, è comunque possibile stimare in $\varphi_{ms}=1.5$ il valore finale dell'incremento del coefficiente di viscosità dovuto all'effetto meccanico-assorbitivo;
- sono stati determinati i valori caratteristici del carico di collasso e medi delle rigidezze secanti e dei coefficienti di viscosità sulla base dei risultati delle prove sperimentali, che possono essere utilizzati nelle verifiche di collasso ed in esercizio di travi composte legno-calcestruzzo con connettori "Tecnaria";
- sono state ricavate delle espressioni analitiche approssimate del legame costitutivo e dei coefficienti di viscosità, che possono essere utilizzate per verifiche più dettagliate.

6. RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano:

- l'impresa "Tecnaria Spa", viale Pecori Giraldi 55, Bassano del Grappa (VI), <http://www.tecnaria.it>, per la fornitura dei provini ed il finanziamento delle prove;
- il Prof. Ario Ceccotti, Direttore dell'Istituto per il Legno e le Specie Arboree (IVALSA), per gli utili suggerimenti forniti nella predisposizione dei provini e nella conduzione delle prove;
- l'ing. Claudio Nogarol, per l'elaborazione dei risultati delle prove e la conduzione di alcuni test.

7. BIBLIOGRAFIA

- [01] **A. CECCOTTI**, "Timber-concrete composite structures", Timber Engineering, Step 2, First Edition, Centrum Hout, The Netherlands, pp.E13/1-E13/12, 1995.
- [02] **M. PIAZZA, M. BALLERINI**, "Solai lignei composti: confronto sperimentale tra diverse tipologie di connessione", 3° Workshop Italiano sulle Strutture Composte, Ancona, pp.349-368, 1998.
- [03] **P. GELFI, E. GIURIANI, A. MARINI**, "Comportamento della connessione a piolo nelle travi miste in legno e calcestruzzo: modellazione teorica e confronti sperimentali", 3° Workshop Italiano sulle Strutture Composte, Ancona, pp.227-236, 1998.
- [04] **A. KENEL, U. MEIERHOFER**, "Holz/Beton-Verbund unter langfristiger Beanspruchung", Forschungs-und Arbeitsbericht 115/39 EMPA, Abteilung Holz, Dübendorf, 1998 (in Tedesco).
- [05] **COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION**, "Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, ENV 1995-1-1; Part 2: Bridges, ENV 1995-2", Bruxelles, Belgio, 1996.
- [06] **M. FRAGIACOMO, A. CECCOTTI**, "On the design of timber-concrete composite beams according to the new versions of Eurocode 5", 35° Meeting della Commissione di lavoro W18-Timber Structures, CIB, Giappone, 2002.
- [07] **E. STEINBERG, R. SELLE, T. FAUST**, "Connectors for timber-lightweight concrete composite structures", Journal of Structural Engineering, Vol. 129(11), pp.1538-1545, 2003.
- [08] **G. BONAMINI, A. CECCOTTI, L. UZIELLI**, "Prove sperimentali a breve e lungo termine su elementi composti calcestruzzo - legno antico di quercia e di larice", 8° Congresso C.T.E., Bologna, pp.241-251, 1990.
- [09] **M. PIAZZA**, "Some notes about time-dependent deformations of connections carried out by means of glued steel bars in wooden structures", Comunicazione al RILEM T.C. 112 Meeting, Londra, Inghilterra, 1990.
- [10] **U. KUHLMANN, B. MICHELFELDER**, "Grooves as shear-connectors in timber-concrete composite structures", 8th World Conference on Timber Engineering WCTE 2004, Lahti, Finlandia, Vol.1, pp.301-306.
- [11] **COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION**, "Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, ENV 1992-1-1; Part 1-4: General rules – Lightweight aggregate concrete with closed structure, ENV 1992-1-4", Bruxelles, Belgio, 1991.
- [12] **COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION**, "Timber structures – Glued laminated timber – Strength classes and determination of characteristic values, prEN 1194", Bruxelles, Belgio, 1998.
- [13] **COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION**, "Timber structures – Joints made with mechanical fasteners – General principles for the determination of strength and deformation characteristics, EN 26891", Bruxelles, Belgio, 1991.
- [14] **J. G. OLLGARD, R. G. SLUTTER, J. W. FISCHER**, "Shear strength of stud connectors in lightweight and normal concrete", AISC Eng. J., Vol. 8, pp.55–64, 1971.
- [15] **T. TORATTI**, "Creep of timber beams in a variable environment", Report 31, Lab. of Struct. Engin. and Build. Physics, Helsinki Univ. of Technology, Finland, 1992.
- [16] **A. HANHIJÄRVI**, "Deformation kinetics based rheological model for the time-dependent and moisture induced deformation of wood", Wood Science and Technology, Vol. 29, pp.191-199, 1995.

Contatti con gli autori:

M. Fragiaco: fragiaco@dic.units.it

C. Amadio: amadio@univ.trieste.it

L. Macorini: macorini@dic.units.it



Foto delle prove del comportamento a collasso sui provini.