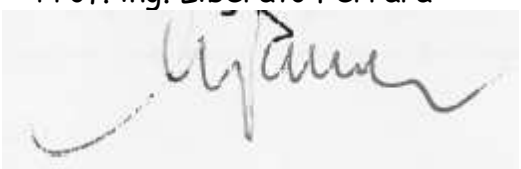
POLITECNICO DI MILANO

Relazione finale del contratto di consulenza
Politecnico di Milano – Laterlite

"Caratterizzazione del comportamento di resine epossidiche per il consolidamento di solai in latero-cemento"

Relazione redatta da:
dr.ing. Patrick Bamonte
prof. ing. Liberato Ferrara

Il responsabile del contratto
Prof. ing. Liberato Ferrara



Politecnico di Milano
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Piazza Leonardo da Vinci, 32
20133 Milano
Tel. 02 2399
Fax 02 2399
www.dica.polimi.it
Partita Iva: 04376620151
Codice fiscale: 80057930150

Campo di applicazione

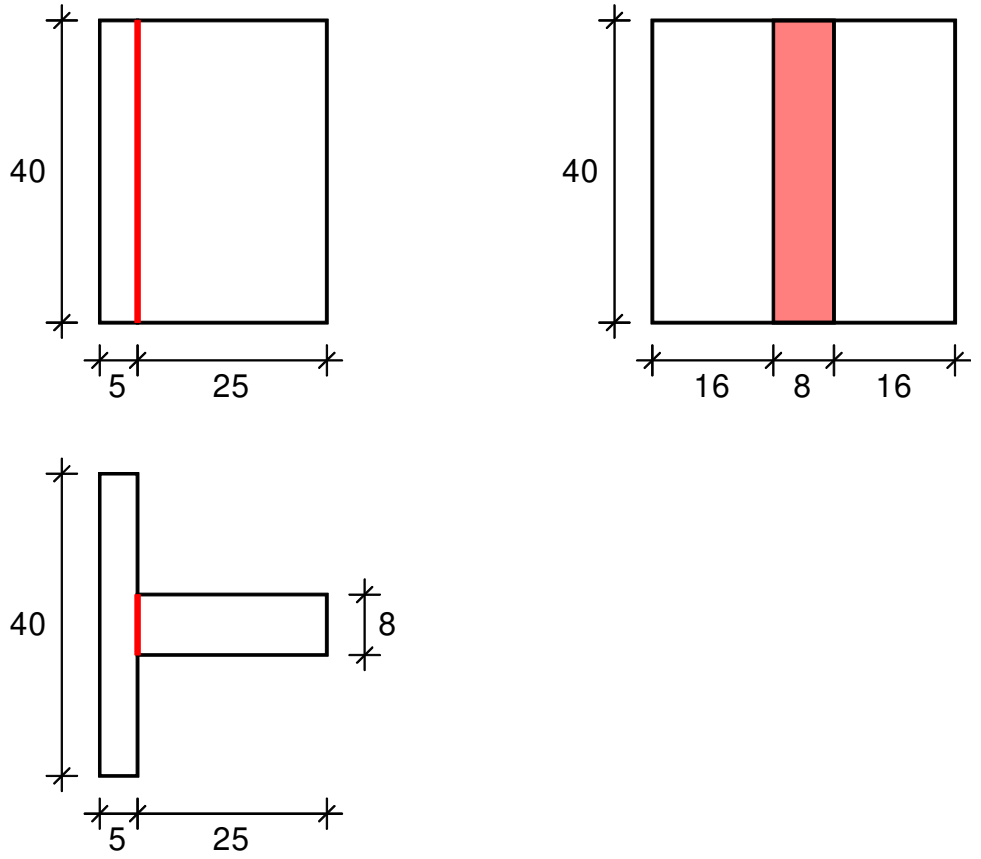
Il connettore chimico CentroStorico trova il proprio utilizzo ideale nell'ambito del consolidamento di solai esistenti in laterocemento. Tale consolidamento si rende necessario in presenza di strutture progettate per carichi di utilizzo inferiori a quelli attualmente previsti per gli edifici ordinari di civile abitazione (carico variabile tipico = 2.00 kN/m^2).
E' bene precisare che il connettore chimico presenta alcuni vantaggi rispetto alle soluzioni tradizionalmente utilizzate, come le chiodature:

- semplificazione del procedimento di posa in opera;
- realizzazione di un'interfaccia continuo, senza le concentrazioni tensionali tipiche delle unioni discontinue.

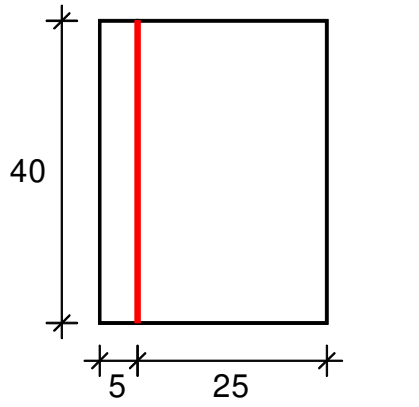
Descrizione della modalità di prova

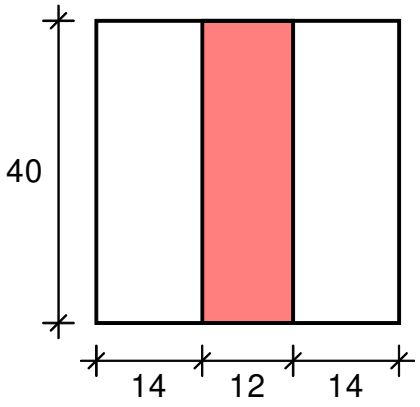
Le prove sperimentali sono state effettuate su provini con sezione orizzontale a T. All'interfaccia tra le due porzioni che costituiscono la sezione è previsto l'incollaggio con la resina. La geometria del provino è riportata nella figura seguente, con l'indicazione delle dimensioni in centimetri. La superficie di interfaccia sede dell'incollaggio è evidenziata in colore rosso.

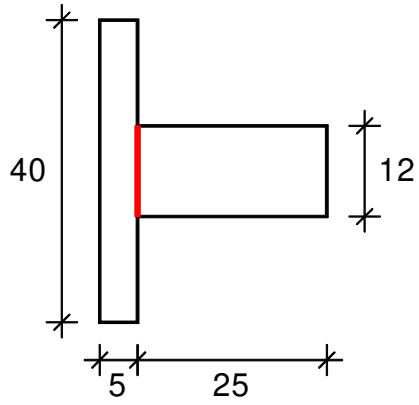
Misure del provino in centimetri
(Scala 1:10)



Misure del provino in centimetri (Scala 1:10)







La fotografia seguente riporta lo schema della modalità di prova.
Con il provino in posizione verticale, attraverso un martinetto (capacità massima = 100 kN) viene applicato un carico verso l'alto, il cui valore viene monitorato attraverso una cella di carico interposta tra la base del martinetto ed il riferimento. L'effetto ribaltante del carico (applicato eccentricamente) viene contrastato attraverso un sistema di barre ancorate al supporto di base (che lavorano a trazione) ed un appoggio sul riferimento (in compressione).
Il sistema di carico così concepito garantisce uno stato di sforzo all'interfaccia costituito pressochè solamente da tensioni tangenziali, con la riduzione degli effetti flettenti. La minimizzazione della distanza tra il carico ed il contrasto a trazione consente di limitare le rotazioni in corrispondenza del punto di applicazione del carico (la testa del martinetto, che sarà comunque dotata di snodo).

reazione
incollaggio
reazione
carico applicato

Riepilogo risultati sperimentali

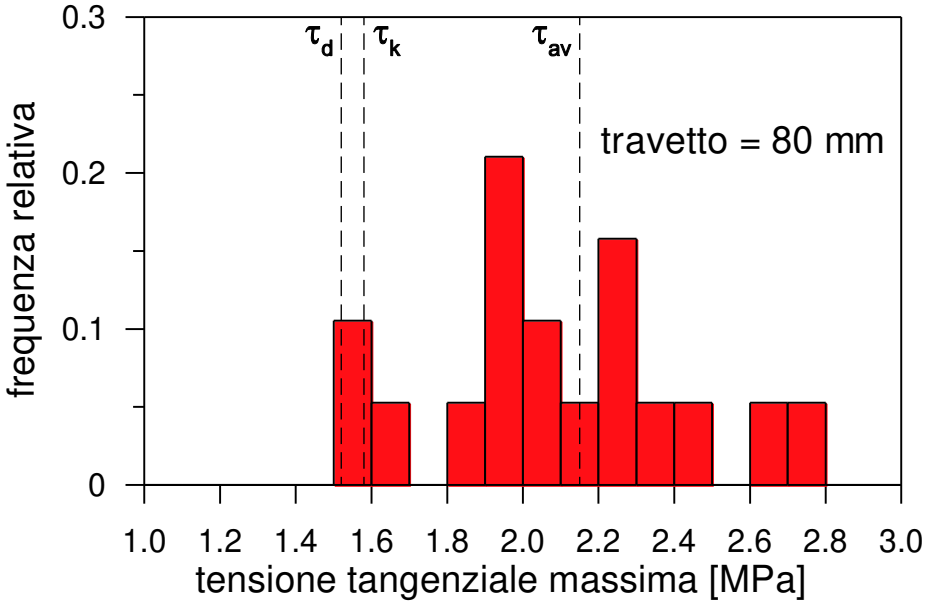
Le prove sperimentali di caratterizzazione della massima tensione tangenziale sostenibile da parte della resina sono state eseguite su campioni "a T", verificando la capacità di diverse resine per diversi valori della area di "incollaggio".
Nella tabella seguente è mostrato un riepilogo del programma sperimentale di caratterizzazione eseguito.

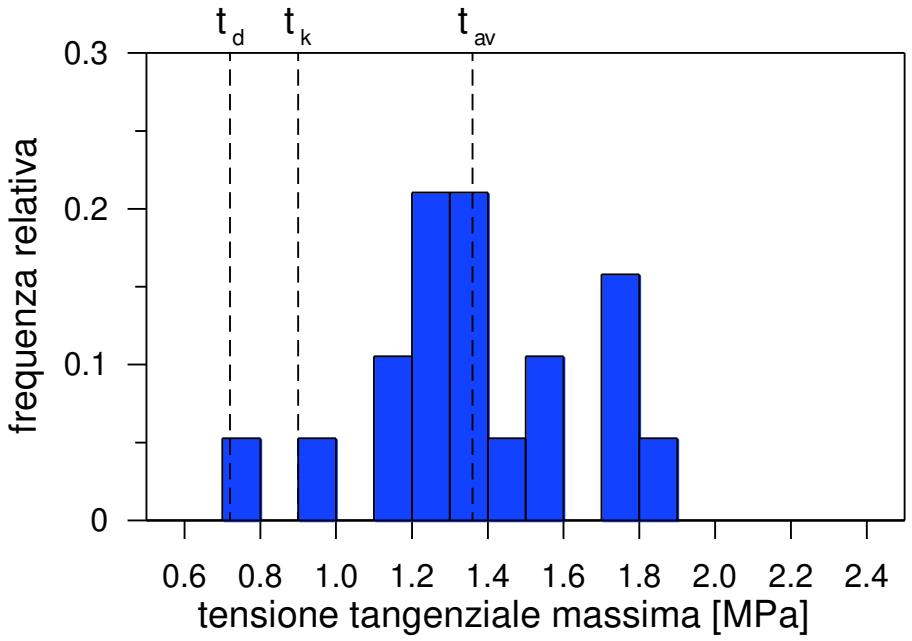
Larghezza del travetto = 80 mm			Larghezza del travetto = 120 mm		
provino	P_{max} [kN]	τ_{max} [N/mm^2]	provino	P_{max} [kN]	τ_{max} [N/mm^2]
CC-80-1	83.92	2.62	CC-120-1	64.22	2.01
CC-80-2	61.90	1.93	CC-120-2	55.08	1.72
CC-80-3	71.57	2.24	CC-120-3	67.01	2.09
CC-80-4	48.31	1.51	CC-120-4	63.21	1.98
CC-80-5	71.84	2.24	CC-120-5	81.89	1.71
CC-80-6	58.70	1.83	CC-120-6	75.65	1.58
CC-80-7	63.73	1.99	CC-120-7	69.38	1.45
CC-80-8	54.04	1.69	CC-120-8	84.62	1.76
CC-80-9	73.75	2.30	CC-120-9	83.87	1.75
CC-80-10	50.95	1.59	CC-120-10	61.15	1.27
CC-80-11	63.98	2.00	CC-120-11	86.81	1.81
CC-80-12	61.88	1.93	CC-120-12	33.80	0.70
CC-80-13	78.93	2.47	CC-120-13	64.18	1.34
CC-80-14	67.19	2.10	CC-120-14	54.30	1.13
CC-80-15	67.60	2.11	CC-120-15	44.07	0.92
CC-80-16	73.08	2.28	CC-120-16	62.17	1.30
CC-80-17	66.84	2.09	CC-120-17	73.30	1.53
CC-80-18	98.79	3.09	CC-120-18	60.35	1.26
CC-80-19	88.88	2.78	CC-120-19	58.06	1.21

Onde ottenere un valore caratteristico da impiegare nelle successive verifiche i dati sono stati aggregati considerando separatamente i dati relativi alle due dimensioni del travetto indagate.

gruppo	media	dev.st.	c.o.v.	τ_k [N/mm^2]	τ_d [N/mm^2]
CC-80	2.15	0.39	18.0%	1.58	1.52
CC-120	1.36	0.28	20.5%	0.90	0.72

Le figure seguenti mostrano la distribuzione dei dati sperimentali, per i due gruppi considerati, con l'indicazione del valor medio τ_{av}, caratteristico τ_k e di progetto τ_d. Il valore caratteristico ed il valore di progetto sono stati ottenuti come frattili rispettivamente di ordine 5% e 0.5% delle relative distribuzioni.





La modalità di rottura dei campioni, nella quasi totalità dei casi, è stata caratterizzata da una frattura cosiddetta coesiva, ossia di rottura lungo il piano di interfaccia con asportazione di uno strato di materiale dal supporto, come evidenziato nelle immagini seguenti.

ESTINTORE
CAMP. 3
CAMPIONE
3
8/12/14

Valutazioni sul comportamento strutturale

La resistenza di elementi reali, consolidati con il connettore chimico, può essere effettuata a partire dalle prescrizioni normative per la resistenza a taglio di elementi privi di armatura trasversale (staffe). All'interno di tale tipologia rientrano i tipici solai in laterocemento utilizzati in Italia.
Si può affermare che il consolidamento con il connettore chimico è adeguato, se esso non limita, per raggiungimento della resistenza limite all'interfaccia, la capacità portante dell'elemento; in buona sostanza, l'interfaccia con l'incollaggio non deve costituire "l'anello debole" nella catena dei meccanismi resistenti a taglio.
Prendendo in esame le più comuni prescrizioni normative, riepilogate nel seguito, il taglio limite che l'interfaccia con incollaggio può trasmettere non deve risultare minore del taglio massimo garantito dall'elemento strutturale nel suo complesso. Considerando il comportamento a taglio di un elemento privo di armatura trasversale, il taglio massimo che può essere trasmesso all'interfaccia può essere valutato mediante la seguente espressione:

$$V_{INT} = \tau_d \cdot bw \cdot z$$

dove

- τ_d è la tensione limite di progetto garantita dall'incollaggio;
- b_w è la larghezza minima della sezione;
- z è il braccio della coppia interna, pari a 0.9d, con d altezza utile della sezione.

Si riepilogano di seguito le principali prescrizioni normative in tema di resistenza allo stato limite ultimo per taglio di elementi strutturali privi di armatura trasversale.
Il comportamento a taglio di elementi privi di armatura trasversale viene interpretato mediante il modello "a pettine" (Kani, 1964), nel quale il meccanismo resistente fondamentale consiste nella resistenza a trazione del calcestruzzo integro compreso tra due fessure consecutive (che il modello considera inclinate a 45°). A tale meccanismo si aggiungono altri contributi secondari, quali l'effetto bietta (legato alla rigidezza a taglio dell'armatura longitudinale) e l'ingranamento degli aggregati. A fronte della buona prova fornita dalle formule di calcolo basate sul citato modello, permangono tuttora notevoli incertezze sul ruolo di alcuni parametri in gioco: tali formule sono infatti frutto dell'interpretazione dei risultati sperimentali, e dunque inevitabilmente affette da un qualche grado di incertezza.
Si ritiene quindi utile riportare non solo la versione più recente della formula per la resistenza a taglio di elementi privi di armatura trasversale (recepita dalle NTC08 e dall'Eurocodice 2 – UNI EN 1992-1-1), ma anche alcune versioni precedenti (ENV 1992-1-1 e DM 9/1/1996).

NTC08

La resistenza a taglio per elementi privi di armatura trasversale può essere valutata con l'espressione di cui al Paragrafo 4.1.2.1.3.1:

$$V_{Rd,NTC08} = \{0.18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck}\}^{1/3} / \gamma_c \cdot + 0.15 \cdot \sigma_{cp}\} \cdot b_w \cdot d \geq (v_{min} + 0.15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

con
$k = 1 + (200/d)^{1/2} \leq 2$
$v_{min} = 0.035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$

e dove
- d è l'altezza utile della sezione (in mm);
- $\rho_l = A_{sl}/(b_w \cdot d)$ è il rapporto geometrico dell'armatura longitudinale (≤ 0.02);
- $\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c$ è la tensione media di compressione nella sezione ($\leq 0.20 f_{cd}$);
- b_w è la larghezza minima della sezione (in mm).

UNI ENV 1992-1-1 (Paragrafo 4.3.2.3)

$$V_{Rd,ENV} = [\tau_{Rd} \cdot r \cdot (1.2 + 40 \cdot \rho_l) + 0.15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d$$

dove
- τ_{Rd} è la tensione tangenziale massima di calcolo;
- $r = (1.6 - d)$ con d espressa in metri e comunque $d \leq 0.60$ m;
- $\rho_l = A_{sl}/(b_w \cdot d)$ è il rapporto geometrico dell'armatura longitudinale (≤ 0.02);
- $\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c$ è la tensione media di compressione nella sezione ($\leq 0.20 f_{cd}$).

La tensione tangenziale massima di calcolo è fornita, in funzione del coefficiente di sicurezza γ_c, nella tabella seguente (Prospetto 4.8) al variare della resistenza caratteristica cilindrica del calcestruzzo f_{ck}.

	f_{ck}	12	16	20	25	30	35	40	45	50
γ_c=1,5	τ_{Rd}	0,18	0,22	0,26	0,30	0,34	0,37	0,41	0,44	0,48
γ_c=1,6	τ_{Rd}	0,17	0,21	0,24	0,28	0,32	0,35	0,38	0,41	0,45

D.M. 9/1/1996 (Par. 4.2.2.2.2)

$$V_{Rd,DM} = 0.25 \cdot f_{ctd} \cdot r \cdot (1 + 50 \cdot \rho_l) \cdot b_w \cdot d \cdot \delta$$

dove
- f_{ctd} è la resistenza a trazione di calcolo ($= f_{ctk}/\gamma_c$);
- $r = (1.6 - d)$ con d espressa in metri e comunque $d \leq 0.60$ m;
- $\rho_l = A_{sl}/(b_w \cdot d)$ è il rapporto geometrico dell'armatura longitudinale (≤ 0.02);
- δ è un coefficiente che tiene conto della presenza di azione assiale ($\delta = 1$ in assenza di sforzo normale).

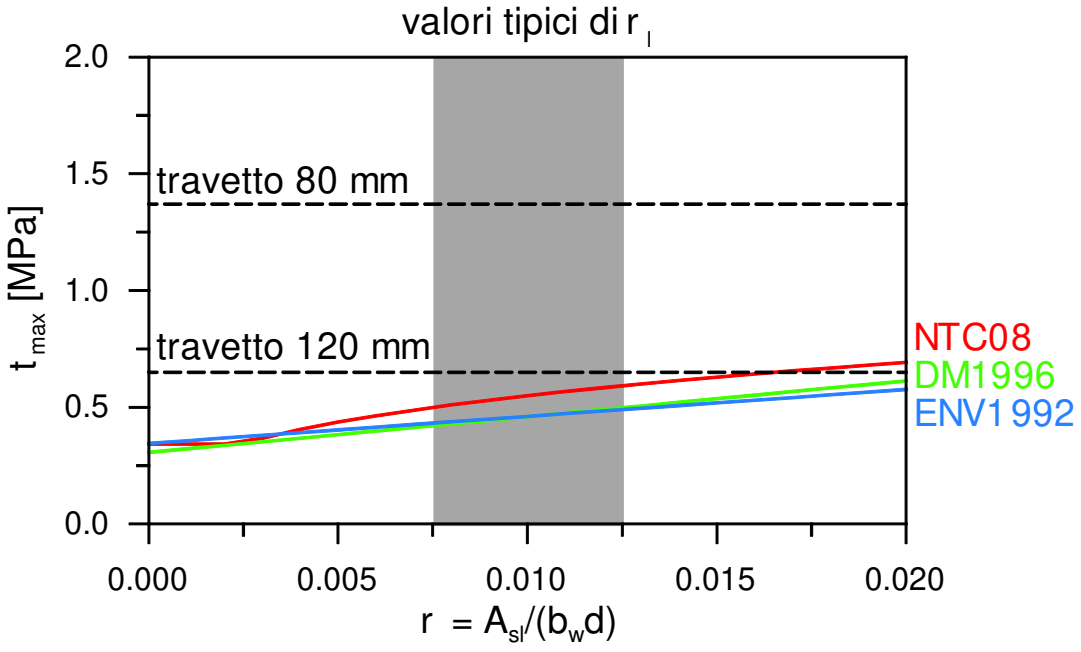
Il valore medio della resistenza a trazione semplice (assiale) in mancanza di sperimentazione diretta può essere assunto pari a (Par. 2.1.2):

$$f_{ctm} = 0.27 \cdot (R_{ck})^{2/3}$$

Il valore caratteristico f_{ctk} corrispondente al frattile 5% può assumersi pari a $0.7 \cdot f_{ctm}$.

Come si può notare, sia l'espressione che fornisce il taglio massimo che può essere trasmesso dall'interfaccia, sia le tre espressioni fornite dalle normative richiamate, dipendono linearmente dalla larghezza minima e dall'altezza utile della sezione. Al fine di trarre delle considerazioni di carattere generale, in quanto segue si farà riferimento non ai tagli (che dipendono dalle dimensioni dell'elemento) ma bensì alle tensioni tangenziali massime, definite normalizzando i tagli per il rapporto $b_w \cdot d$. La classe del calcestruzzo, in ossequio all'applicazione pensata per il connettore (consolidamento di solai con calcestruzzo a bassa resistenza), è C12/15. In merito al quantitativo d'armatura, che compare nelle tre espressioni di normativa attarverso il rapporto geometrico, si prenderà in considerazione l'intervallo 0.00-2.00%, che copre tutti i casi di interesse pratico. Quanto ai coefficienti correttivi per l'effetto dell'ingranamento (k ed r), si considereranno, a favore di sicurezza, i valori massimi previsti in normativa (2 e 1.6 rispettivamente). In tutti i casi è stata considerata nulla l'azione assiale ($\sigma_{cp} = 0$ ovvero $\delta = 1$).
Nel grafico seguente si riportano gli andamenti delle seguenti grandezze in funzione del rapporto geometrico di armatura longitudinale:

- $\tau_{INT} = 0.9 \cdot \tau_d$ (linee tratteggiate)
- $\tau_{NTC} = \{0.18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c\} \geq v_{min}$ (curva rossa)
- $\tau_{ENV} = \tau_{Rd} \cdot r \cdot (1.2 + 40 \cdot \rho_l)$ (curva blu)
- $\tau_{DM} = 0.25 \cdot f_{ctd} \cdot r \cdot (1 + 50 \cdot \rho_l)$ (curva verde)



Dal grafico si evidenzia come la tensione tangenziale limite all'interfaccia sia sempre superiore alle tensioni massime ottenute con le prescrizioni normative, ad esclusione di un intervallo limitato per $\rho_{sl} \geq 1.5\%$ dove risulta $\tau_{NTC} > \tau_{INT}$ (per il travetto di larghezza pari a 120 mm).

A completamento delle suddette prove sono state eseguite ulteriori 7 prove in cui a contatto con la lastra in calcestruzzo di dimensioni 40 x 5 x 40 cm3 era disposto un fondello scanalato in laterizio, di dimensioni pari a 11.5 x 5 x 40 cm circa, quale tipicamente utilizzato per la realizzazione di architravi in edifici in muratura, laddove la scanalatura viene riempita mediante calcestruzzo ed altresì opportunamente armata a garantire una minima resistenza flessionale all'architrave stessa.
Il set-up utilizzato per la esecuzione di tali prove, modificato rispetto a quello utilizzato per le prove di aderenza calcestruzzo-calcestruzzo a motivo della minore resistenza del fondello in laterizio contro cui il pistone si trova a spingere per la applicazione del carico) è illustrato nella figura seguente.

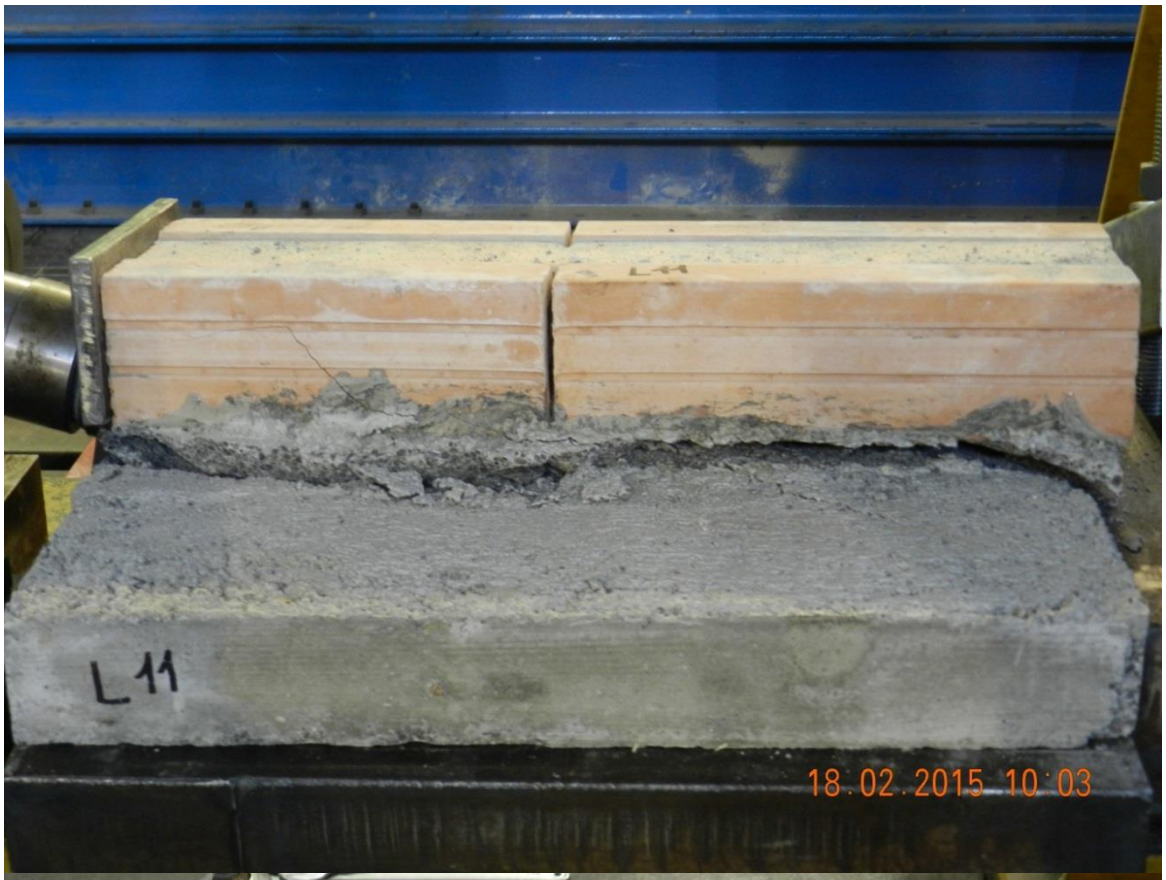
Set-up sperimentale impiegato per la realizzazione di prove su interfaccia calcestruzzo/fondello in laterizio

In tre delle suddette prove il fondello in laterizio è stato "incollato" alla lastra di calcestruzzo, mediante la resina epossidica oggetto del presente studio, lungo la superficie continua di laterizio; nelle altre quattro l'incollaggio è avvenuto lungo il lato scanalato, con la scanalatura preventivamente riempita con il medesimo calcestruzzo utilizzato per la realizzazione della lastra stessa. In tal modo lungo gli 1 cm circa di larghezza della "superficie di incollaggio" circa la metà realizza un contatto laterizio/calcestruzzo e la rimanente parte un contatto calcestruzzo/calcestruzzo.
I risultati delle prove sono sintetizzati nella Tabella seguente:

Identificazione campione	**interfaccia**	**Carico max (kN)**	**Tensione tangenziale massima (MPa)**
L11	Calcestruzzo-(cls+laterizio)	80.3	1.75
L13	Calcestruzzo-(cls+laterizio)	61.9	1.35
L15	Calcestruzzo-(cls+laterizio)	64.3	1.40
L16	Calcestruzzo-(cls+laterizio)	78.9	1.72
Media	***Calcestruzzo-(cls + laterizio)***	***71.4***	***1.55***
L12	*Calcestruzzo-laterizio*	38	0.83
L14	*Calcestruzzo-laterizio*	49.1	1.07
L17	*Calcestruzzo-laterizio*	52.8	1.15
Media	***Calcestruzzo-laterizio***	***49.6***	***1.08***

Si osserva che i valori di tensione tangenziale massima ottenuti sono assolutamente confrontabili con quelli ottenuti dalle prove su campioni con incollaggio calcestruzzo/calcestruzzo. Ovviamente, la prestazione dell'interfaccia nel caso dell'incollaggio lungo la superficie continua di laterizio risulta essere inferiore rispetto al caso in cui l'incollaggio sia stato realizzato su un interfaccia "mista" con contatto laterizio+calcestruzzo.

In questo ultimo caso si sono avute rotture tipo "frattura coesiva" ossia lungo la superficie di taglio con asportazione di materiale dalla lastra di calcestruzzo di supporto, come evidenziato nelle immagini seguenti. Nel caso di incollaggio lungo la superficie continua di solo calcestruzzo la rottura è avvenuta con scorrimento lungo le superficie di interfaccia e senza asportazione alcuna di materiale da ambo i lati del supporto.


L11
18.02.2015 10:03

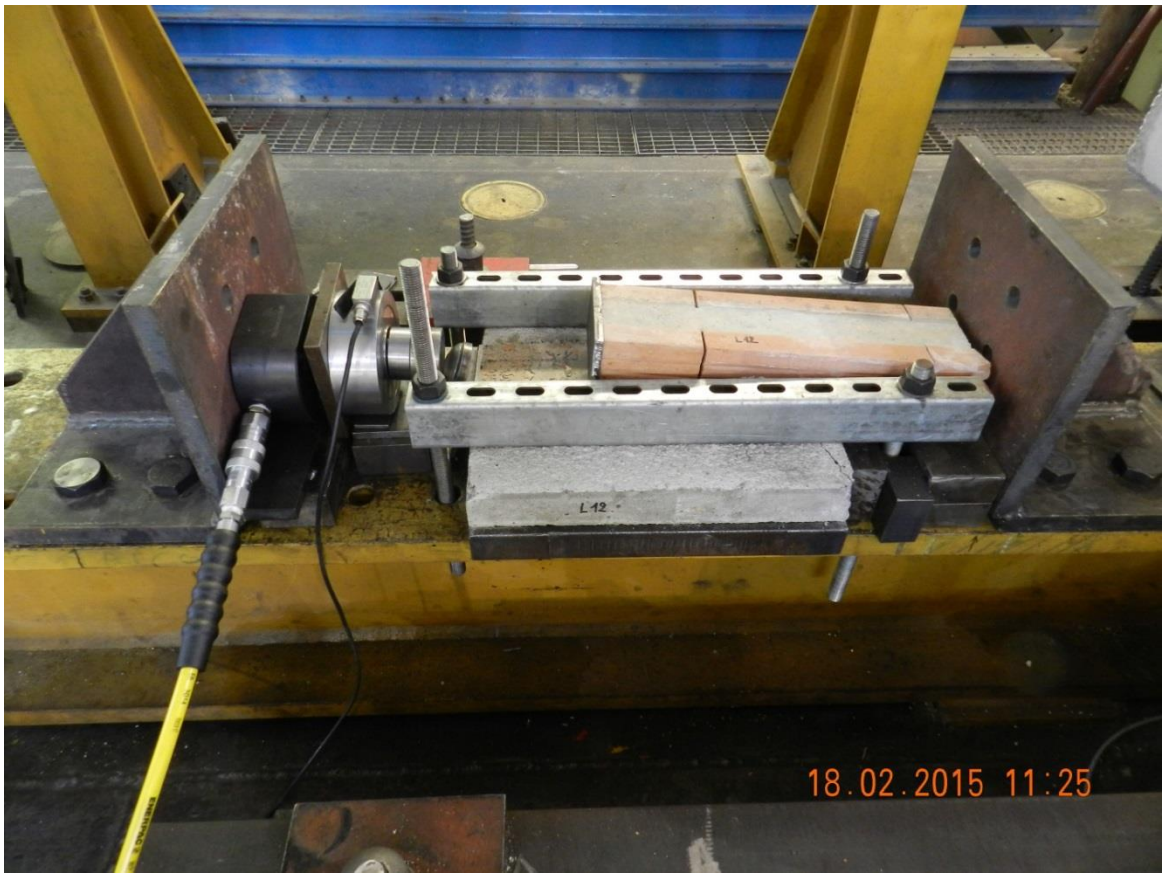
L13
18.02.2015 11:53

18.02.2015 13:49

18.02.2015 15:02

L16
18.02.2015 15:08

L12
18.02.2015 11:29



Conclusioni

A conclusione della campagna sperimentale i cui risultati sono stati illustrati in questo rapporto possono trarsi le seguenti conclusioni:

- Il connettore chimico Centro Storico è in grado di garantire, quando impiegato per il consolidamento di solai esistenti realizzati anche con calcestruzzi di qualità modesta/bassa, valori di tensione tangenziale alla interfaccia fra il solaio esistente (nervature/soletta) e la soletta di consolidamento valori di tensione tangenziale di aderenza calcestruzzo/calcestruzzo pienamente compatibili con i previsti impieghi strutturali;

- I valori di tensione tangenziale di aderenza ottenuti sono confrontabili sia per aderenza calcestruzzo/calcestruzzo sia per aderenza fra supporto in calcestruzzo e laterizio (eventualmente supporto misto);

Si ravvisa, a completamento di questa indagine preliminare eseguita, la necessità di procedere a prove su mock-up strutturali sia per validare su scala reale le risultanze sperimentali relativamente alla crisi per taglio degli elementi di solaio sia per verificare gli effetti dell'incollaggio, nel caso di consolidamento, sullo sviluppo di una larghezza collaborante per trasferimento delle tensioni da nervature preesistenti alla soletta di consolidamento successivamente gettata.