



Effetto del sistema di prova sulla resistenza per aderenza calcestruzzo-FRP

Marco Savoia, Carlo Mazzotti, Barbara Ferracuti

Università di Bologna, marco.savoia@mail.ing.unibo.it, claudio.mazzotti@unibo.it, barbara.ferracuti@mail.ing.unibo.it

R. Olivito

Università della Calabria

C. Poggi, G. Fava

Politecnico di Milano, carlo.poggi@polimi.it, fava@stru.polimi.it

E. Nigro, A. Bilotta, M. Di Ludovico

Università di Napoli Federico II, eminigro@unina.it, antonio.bilotta@unina.it, diludovi@unina.it

F. Ceroni

Università del Sannio, ceroni@unisannio.it

RIASSUNTO. Nella presente memoria sono presentati i risultati di una campagna sperimentale relativa allo studio della perdita di aderenza tra calcestruzzo e lamine o tessuti di carbonio. Le attività hanno coinvolto cinque diversi laboratori universitari. Lo studio è stato affrontato secondo la formula del Round Robin per poter valutare l'effetto dell'adozione di diversi sistemi sperimentali sulla resistenza alla perdita di aderenza. A questo scopo, sono stati preparati dallo stesso operatore con materiali omogenei 50 provini identici, successivamente soggetti a prova di aderenza nei 5 laboratori coinvolti. Le lamine sono state strumentate mediante estensimetri ed LVDT per poter cogliere nei dettagli il comportamento d'interfaccia. Sui risultati è stata effettuata un'analisi statistica per valutare la loro dispersione e l'influenza degli specifici sistemi sperimentali adottati.

PAROLE CHIAVE. FRP; Aderenza; Interfaccia FRP-calcestruzzo; Round robin; Prova sperimentale.

INTRODUZIONE

Nel rinforzo di elementi in c.a. mediante lamine o tessuti in materiale composito, il problema dell'aderenza tra calcestruzzo e composito è estremamente importante in quanto la perdita di aderenza è un meccanismo di crisi fragile e deve essere assolutamente evitato. Il problema è complesso in quanto dipende dalle proprietà del calcestruzzo, del composito e della colla. Tuttavia, una sua corretta definizione è quanto mai indispensabile per la valutazione, attraverso l'uso di leggi di interfaccia, della resistenza ultima nei confronti del distacco tangenziale.

In letteratura [1], le prove di aderenza FRP-calcestruzzo sono state condotte adottando diversi set-up di prova. E' stato osservato che diverse metodologie di prova possono condurre a valori di forza di distacco tangenziale significativamente diversi. Per tale motivo, molti dati sperimentali disponibili in letteratura non sono fra loro direttamente confrontabili.



Nel presente studio, vengono descritte le fasi di svolgimento ed i risultati di un'estesa campagna sperimentale, condotta da diversi laboratori universitari (Università di Bologna, Università della Calabria, Politecnico di Milano, Università Federico II di Napoli e Università del Sannio), allo scopo di definire un sistema ed una procedura standard di prova di aderenza. A tal fine, seguendo la metodologia del Round Robin, è stata preparata presso l'Università di Bologna una serie di provini in calcestruzzo rinforzati sia con lamine che con tessuti in CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). Gruppi di provini omogenei sono quindi stati sottoposti a prova di aderenza utilizzando apparecchiature, metodologie e procedure differenti. Ogni laboratorio ha utilizzato provini in calcestruzzo rinforzati sia con lamine che con tessuti, aventi due diverse lunghezze di ancoraggio ed ogni tipologia di prova è stata ripetuta tre volte da ogni laboratorio, per un totale di 12 test. Un numero ridotto di prismi è stato sottoposto a prova presso l'Università della Calabria, secondo le metodologie da loro messe a punto per le prove in cantiere. Questo ha permesso di confrontare i risultati delle prove ottenuti con l'attrezzatura per prove in situ con quelli ottenuti con sistemi di prova da laboratorio.

L'analisi comparativa dei risultati ha consentito un'osservazione critica dei sistemi sperimentali proposti, allo scopo di evidenziare eventuali aspetti meccanici o di procedura tali da alterare il risultato sperimentale; sono state ottenute, inoltre, indicazioni sulla dispersione statistica dei risultati legata alla metodologia sperimentale adottata. Lo studio qui descritto rappresenta la prima delle attività necessarie per la definizione di un sistema e di un protocollo di prova di aderenza standard, che troveranno collocazione nelle nuove istruzioni CNR DT200 [2] per la caratterizzazione della resistenza per aderenza calcestruzzo-FRP.

Per garantire lo spirito di un'attività tipo Round Robin, nel seguito le attività condotte ed i risultati ottenuti dalle varie Università saranno descritte in maniera anonima. I singoli sistemi sperimentali saranno indicati come Unità 1-Unità 5, associate in maniera casuale ai partecipanti alla ricerca.

CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI

Prismi di calcestruzzo

Per lo svolgimento delle attività di Round Robin sono stati realizzati ventisei prismi di calcestruzzo di dimensione 150x200x600 mm, rinforzati mediante lamine e tessuti in CFRP. Il confezionamento di tutti i prismi ed il loro rinforzo sono stati effettuati presso il Laboratorio Prove Strutture dell'Università di Bologna, al fine di garantire l'omogeneità dei provini in termini di proprietà dei materiali e qualità della messa in opera.

I prismi sono stati realizzati con calcestruzzo di qualità medio-bassa, tipico di strutture in c.a. da rinforzare; il getto è stato eseguito in casseforme di legno e costipato meccanicamente mediante vibratore ad ago. Contestualmente, sono stati confezionati anche cinque cilindri standard (150x300 mm – $\phi \times l$) impiegati per la caratterizzazione meccanica del calcestruzzo.

I provini sono stati scasserati dopo 24 ore dal getto, mantenuti per 28 giorni sotto panni umidi e poi esposti all'aria. Dalle prove sui cilindri, effettuate parallelamente alle prove di aderenza con un'età del calcestruzzo di circa 10 mesi, si è ottenuto un valore di resistenza media a compressione $f_{cm}=26$ MPa, un valore di resistenza a trazione (mediante prova di trazione indiretta) $f_{ctm}=2.96$ MPa e un modulo elastico $E_{cm}=22400$ MPa.

Adesivi

Le superfici dei prismi sono state pre-impregnate mediante un *primer* (CARBOSTRU® RS85) costituito da resina epossidica (Fig. 1).

Successivamente, è stata usata la resina epossidica bicomponente Sikadur 30. Secondo quanto dichiarato dal produttore, ha un peso specifico $\gamma_a=16.5$ kN/m³, un modulo elastico $E_a=12800$ MPa ed una resistenza a taglio $\tau_a>15$ MPa.

Materiale composito

Le lamine di materiale composito, di tipo CFRP Sika CarboDur S812, hanno larghezza pari a 80 mm e spessore di 1.2 mm. Secondo i dati forniti dal produttore, le lamine hanno una percentuale volumetrica di fibre di carbonio pari al 70% e una matrice epossidica; la resistenza minima a trazione è pari a 2200 MPa e il modulo elastico medio misurato durante la prova è pari a $E_f=180000$ MPa.

I tessuti di materiale composito (CFRP Sika Wrap 300 C), hanno larghezza pari a 100 mm, spessore 0.166 mm e modulo elastico medio misurato pari a $E_f=241000$ MPa.

Parte delle proprietà meccaniche relative ai materiali compositi e agli adesivi sono state definite utilizzando un protocollo di controllo dei materiali compositi denominato Cokit test [03]. Tale procedura, standardizzata (Fig 2), si prefigge



L'obiettivo di verificare le caratteristiche fisiche del tessuto utilizzato, le caratteristiche meccaniche del materiale composito preparato in cantiere e le proprietà meccaniche dell'adesivo strutturale impiegato per l'incollaggio del rinforzo.

Preparazione dei provini

Tutti i prismi sono stati rinforzati su due facce opposte, preventivamente trattate mediante sabbiatura al fine di asportare il latte di cemento superficiale.

Tredici prismi sono stati rinforzati su una faccia con una lamina di larghezza 80 mm e lunghezza di incollaggio pari a 100 mm mentre sull'altra con lo stesso tipo di lamina ma con lunghezza di incollaggio pari a 400 mm; analogamente, sui restanti prismi sono stati incollati tessuti di larghezza 100 mm e lunghezza di incollaggio pari a 100 mm e 400 mm sulle due facce opposte. Tutti i rinforzi sono stati incollati a partire da una distanza di 100 mm dal bordo frontale del prisma (Fig. 1).

I prismi sono stati impregnati mediante primer, su cui è stato steso uno strato di adesivo di circa 0.5 mm sul quale è stato posizionato il rinforzo. I tessuti sono stati ulteriormente impregnati a rifiuto con un altro strato di primer.

Il periodo di maturazione prima dello svolgimento della prove è stato pari a 5 mesi.



Figura 1: Fase di impregnazione delle superfici di calcestruzzo mediante primer.



Figura 2: Cokit test: fase di incollaggio del tessuto CFRP su supporto in teflon.

SETUP SPERIMENTALE

I provini rinforzati, preparati come descritto nel paragrafo precedente, sono stati distribuiti ai diversi Laboratori di prova secondo lo schema riportato nella Tab. 1. In particolare, per ogni tipologia di materiale e di lunghezza di ancoraggio sono stati distribuiti tre campioni, per un totale di dodici campioni di prova a Laboratorio. L'Unità 5, che



utilizzava una attrezzatura di prova mobile per applicazioni in cantiere, ha ricevuto una coppia di campioni per ogni tipo di materiale ma solo per la lunghezza di ancoraggio di 400 mm.

Nel seguito, sono descritti i diversi set-up sperimentali adottati dalle varie Unità per effettuare le prove di aderenza.

Unità 1

Nel set-up proposto dall'Unità 1, i prismi di calcestruzzo sono stati posizionati su un piano rigido al quale sono stati vincolati mediante due elementi di contrasto d'acciaio, in grado di impedire spostamenti orizzontali e verticali (Fig. 3); il lato libero della placca è stato incollato ad una piastra d'acciaio libera di ruotare intorno all'asse verticale. La forza di trazione è stata applicata alla piastra di acciaio usando un martinetto meccanico (Fig. 3a); le prove sono state condotte controllando lo spostamento della porzione libera della placca.

Per misurare la forza di trazione applicata all'estremità della placca è stata utilizzata una cella di carico; lungo la placca è stato posizionato un numero variabile da nove a tredici estensimetri (in funzione della lunghezza) lungo l'asse longitudinale della placca. In Tab. 2, per ogni lunghezza di ancoraggio, è riportata la distanza degli estensimetri dall'inizio della porzione incollata del rinforzo. Inoltre, per misurare gli spostamenti sono stati disposti due LVDT (Fig. 3c), all'inizio e alla fine del rinforzo incollato, in modo da poter calcolare l'allungamento della placca durante la prova.

Unità	FRP	N. prismi	N. facce	N. prove
Unità 1	Tessuto	3	2	12
	Lamina	3	2	
Unità 2	Tessuto	3	2	12
	Lamina	3	2	
Unità 3	Tessuto	3	2	12
	Lamina	3	2	
Unità 4	Tessuto	3	2	12
	Lamina	3	2	
Unità 5	Tessuto	1	2	4
	Lamina	1	2	
Totale				52

Tabella 1: Numero di prove condotte dalle diverse unità.

L	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13
100	10	20	30	40	50	60	70	80	90				
400	10	30	50	70	100	130	160	190	220	250	280	320	360

Tabella 2: Unità 1 - Disposizione degli estensimetri lungo il materiale composito.

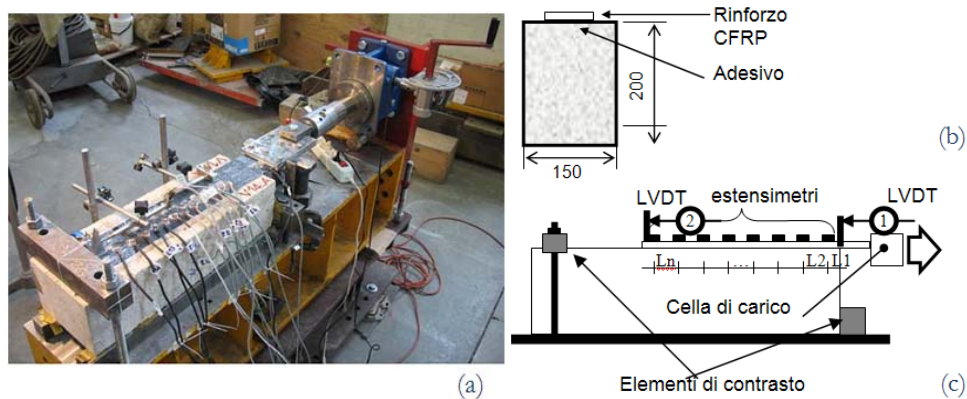


Figura 3: Unità 1 - Setup sperimentale utilizzato nello svolgimento delle prove di aderenza: (a) vista, (b) sezione del provino e (c) schema della strumentazione.

Unità 2

L'Unità 2 ha effettuato le prove di delaminazione utilizzando una macchina di prova elettromeccanica da 1000 kN (Fig. 4a). Il carico applicato al rinforzo è stato misurato attraverso una cella di carico da 100 kN disposta in serie al provino.

È stato predisposto un banco di prova costituito da un telaio formato da 4 angolari, due orizzontali vincolati alla macchina di prova e due verticali collegati attraverso tiranti regolabili ai due angolari orizzontali. I campioni sono stati fissati alla macchina di prova mediante due traverse collegate da tiranti in acciaio (Fig. 4b). Gli spostamenti orizzontali al piede del provino sono stati impediti mediante un dispositivo di vincolo. Sono stati utilizzati due differenti sistemi di afferraggio, per i rinforzi in lamina pultrusa oppure in tessuto. Il corretto allineamento del rinforzo con l'asse geometrico della macchina di prova è agevolato dallo snodo sferico di cui è dotato il terminale della cella di carico.

Per la misura degli spostamenti, sono stati posizionati due trasduttori all'inizio della porzione di rinforzo incollata, un'altra coppia a metà di tale lunghezza ed uno al termine della stessa; gli LVDT sono disposti in modo tale da misurare lo spostamento relativo tra la superficie del prisma e l'estradosso del rinforzo.

Le prove sono state condotte in controllo di spostamento utilizzando come canale di controllo il segnale proveniente dai trasduttori di spostamento disposti lungo il tratto incollato del rinforzo in FRP. Inizialmente il controllo è effettuato dal trasduttore posto più in alto, in sommità al prisma in calcestruzzo. Al progredire del distacco il controllo viene trasferito in successione ai trasduttori posti più in basso verso la fine del rinforzo per poter così seguire il processo durante tutto il suo sviluppo.

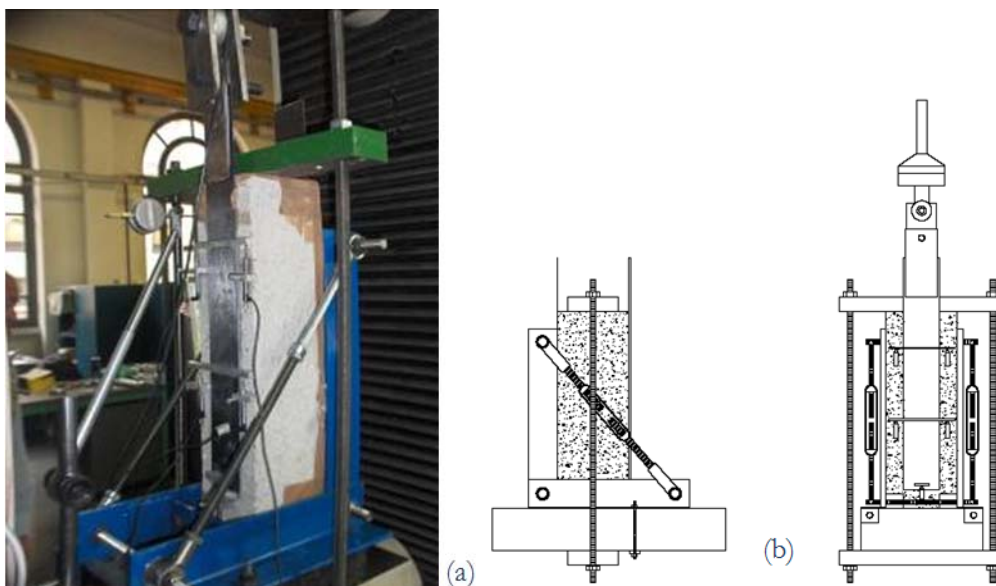


Figura 4: Setup di prova dell'Unità 2.

Unità 3

L'Unità 3 ha effettuato le prove di aderenza utilizzando una macchina universale da 500 kN, in grado di effettuare prove sia in controllo di forza che di spostamento (Fig. 5a). Le ganasce di afferraggio hanno un funzionamento idraulico e sono estremamente rigide. Per poter vincolare il prisma di calcestruzzo in maniera opportuna, si è utilizzato un sistema metallico di contrasto costruito ad hoc e costituito da una coppia di flange metalliche e quattro tiranti imbullonati alle stesse; la flangia inferiore è stata vincolata alla ganascia di ammassamento di base della macchina (mobile) attraverso una piastra verticale bloccata nei cunei idraulici. Il prisma viene tenuto in posizione verticale dalla flangia superiore, ancorata a quella inferiore attraverso i quattro tiranti metallici, così precomprimendo il calcestruzzo. La flangia superiore è sagomata in maniera tale da lasciare passare il rinforzo oggetto della prova ma evitando l'insorgere di eccentricità parassite del carico che potrebbero falsare il risultato della prova (Fig. 5b). L'estremità superiore libera del rinforzo viene serrata nei cunei della ganascia superiore attraverso l'incollaggio di due tabs metallici.

Durante le prove è stata misurata la forza applicata, con una cella di carico, e le deformazioni longitudinali lungo il rinforzo per mezzo di una serie di estensimetri. In Tab. 3, per la lunghezza di ancoraggio pari a 400 mm, è riportata la distanza degli estensimetri dall'inizio della parte incollata del rinforzo.

L	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11
400	10	20	40	60	80	100	120	180	240	300	360

Tabella 3: Unità 2 - Disposizione degli estensimetri lungo il materiale composito.

Unità 4

L'Unità 4 ha effettuato le prove di aderenza utilizzando una macchina universale di tipo elettromeccanico. Il prisma in calcestruzzo è stato inserito all'interno di un telaio metallico di contrasto costituito da quattro barre di diametro 20 mm collegate a due piastre di spessore 20 mm (Fig. 6a). La piastra di base del telaio è bloccata nelle ganasce inferiori della macchina universale mediante una flangia verticale. Un fermo laterale blocca eventuali spostamenti del prisma all'estremo inferiore.

All'estremità libera del rinforzo sono stati incollati due tabs metallici (Fig. 6b) per migliorarne l'afferraggio nelle ganasce superiori (mobili) ed evitare scorrimenti.

In seguito all'applicazione della forza di trazione alla lamina, per contrasto la piastra superiore del telaio esercita una compressione sulla faccia superiore del provino; la piastra di contrasto, tuttavia, si arresta prima del bordo del prisma, lasciando una porzione non direttamente caricata di 30 mm (Fig. 6b).

Durante le prove è stata misurata la forza applicata, con una cella di carico, e la distribuzione delle deformazioni longitudinali lungo il rinforzo disponendo una serie di estensimetri. In Tab. 4, per la lunghezza di ancoraggio pari a 400 mm, è riportata la distanza degli estensimetri dall'inizio della parte incollata del rinforzo.

L	L1	L2	L3	L4	L5
400	50	105	145	205	265

Tabella 4: Unità 4 - Disposizione degli estensimetri lungo il materiale composito.

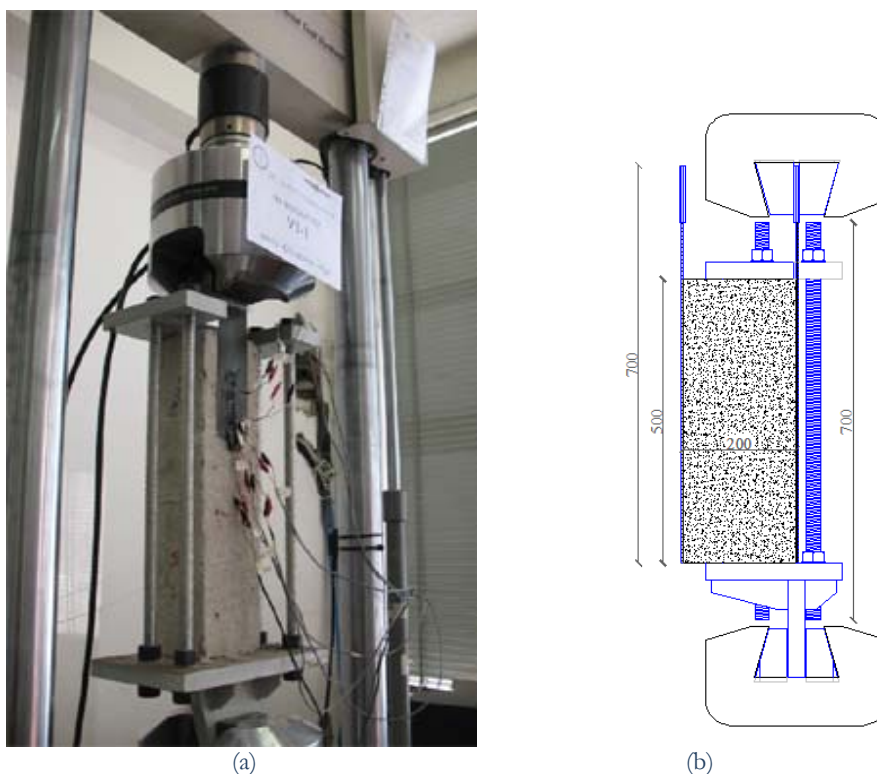
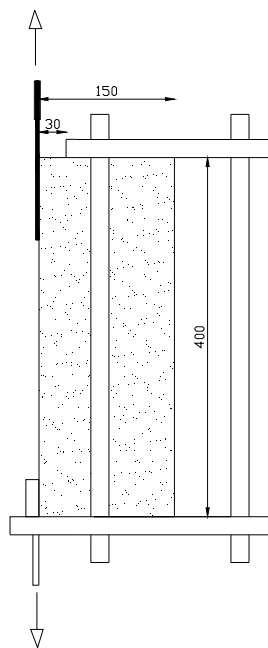


Figura 5: Setup di prova dell'Unità 3.



(a)



(b)

Figura 6: Setup di prova dell'Unità 4.

Unità 5

Le prove di strappo in situ sono rivolte all'accertamento della qualità dell'incollaggio e sono eseguibili, con l'attrezzatura proposta dall'Unità 5, sottoponendo a trazione una porzione di materiale composito nel proprio piano in corrispondenza di uno spigolo (Fig. 7). La prova proposta dall'Unità 5 prevede il montaggio di un angolare metallico di contrasto su uno spigolo della parete interessata e l'ancoraggio del rinforzo ad una coppia di piastre metalliche, alle quali si collega un martinetto meccanico che attraverso un cilindro di spinta applica la forza di trazione. Si procede, quindi, alla messa in tensione della fibra ed all'esecuzione della prova, che fornisce il valore della forza di picco allo strappo tangenziale.

Al fine di poter correlare i risultati delle prove in situ con i risultati delle prove di laboratorio, la strumentazione adottata in cantiere è stata utilizzata per condurre 4 prove di aderenza su altrettanti rinforzi identici a quelli utilizzati per il Round Robin (si veda Fig. 8).

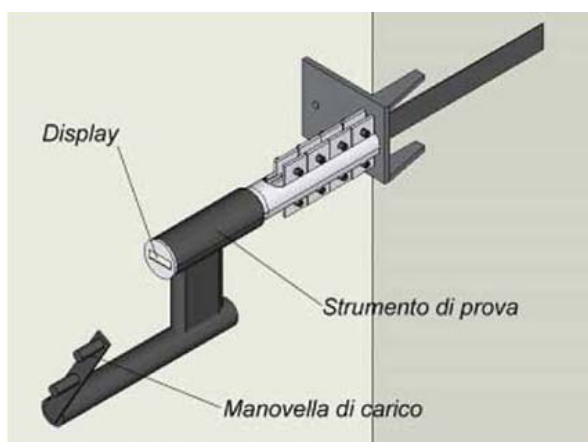


Figura 7: Prova in situ proposta dall'Unità 5.



Figura 8: Unità 5 - Prova in laboratorio con attrezzatura proposta per le prove in situ.



RISULTATI DELLE PROVE DI ADERENZA

Nel presente paragrafo si analizzano i risultati sperimentali ottenuti nei laboratori con i diversi set-up di prova. Innanzitutto, vengono confrontati i risultati in termini di forza di distacco, misurata da tutte le Unità. Successivamente, si riportano i diagrammi forza – allungamento e gli andamenti delle deformazioni lungo il composito per diversi livelli di carico, per le prove delle Unità che utilizzavano strumenti per misurare spostamenti e deformazioni.

In tutte le prove, la modalità di rottura è consistita nel distacco del sistema rinforzo-colla dal calcestruzzo, con asportazione di un substrato di quest'ultimo (Fig. 9).

Forza di distacco tangenziale

I risultati in termini di forza di distacco tangenziale sono riportati nelle Fig. 10 e 11 e sono stati analizzati dal punto di vista statistico. Inizialmente, le prove sono state distinte in blocchi di esperimenti in base alla tipologia di composito ed alla lunghezza di ancoraggio. Per ogni Unità, il blocco degli esperimenti è costituito da tre prove condotte su provini identici, tranne che nel caso dell'Unità 5 che ha condotto 2 prove per le lunghezze di ancoraggio pari a 400mm. Con riferimento ai risultati su provini rinforzati con tessuti incollati al calcestruzzo per una lunghezza di 400 mm e di 100 mm, nelle Fig. 10 a,b sono riportate le forze di distacco ottenute nelle singole prove e il valore medio calcolato considerando i risultati ottenuti dalle prime quattro unità.

I risultati ottenuti dalle Unità 1, 2 e 3 sono pressoché stabili sia per lunghezze di ancoraggio 400 mm che 100 mm, mentre l'Unità 4 ha ottenuto valori sistematicamente più bassi.

Analogamente, in Fig. 11 a,b si riportano i risultati ottenuti dalle prove sulle lamine aventi lunghezze di ancoraggio 400 mm e 100 mm. Anche in questo caso, le Unità 1, 2 e 3 hanno ottenuto risultati simili (un po' superiori alla media quelli dell'Unità 1 per la lunghezza 400 mm), mentre anche in questo caso l'Unità 4 ha ottenuto valori più bassi della forza di distacco.

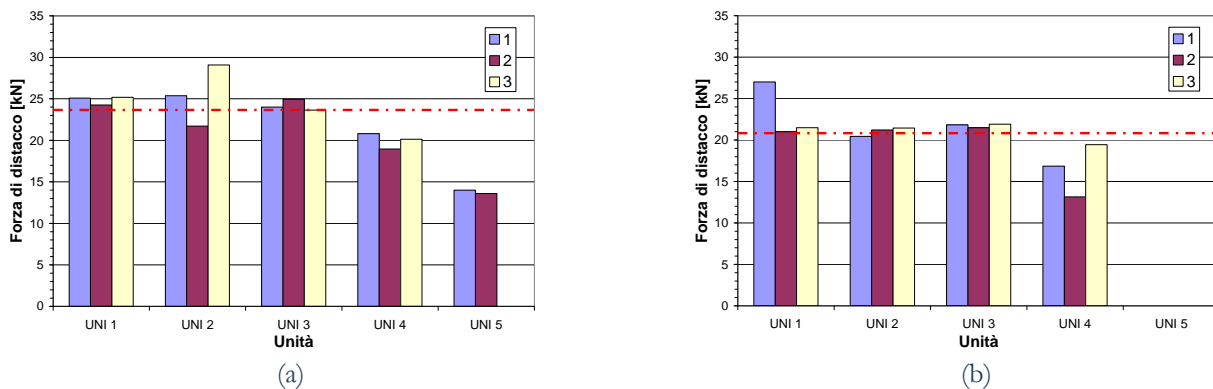


Figura 10: Forza di distacco per tessuti con lunghezze di ancoraggio (a) L=400 mm, (b) L=100 mm.

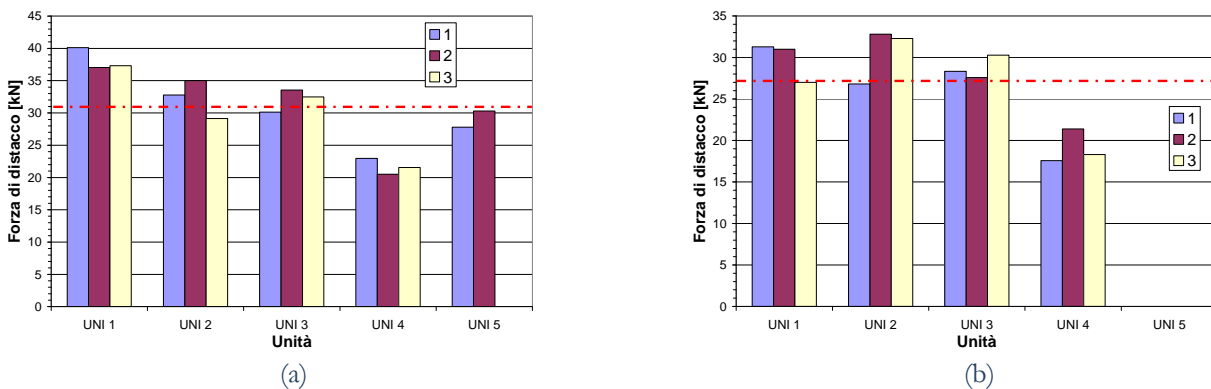


Figura 11: Forza di distacco per lamine con lunghezza di ancoraggio (a) L=400 mm, (b) L=100 mm.



La sistematica sottostima dei valori di resistenza ottenuti dall'Unità è probabilmente riconducibile a flessioni parassite che interessano il sistema di contrasto, che fanno ruotare la testa della macchina e che si traducono in tensioni di peeling significative che riducono un poco la forza di distacco.

I risultati ottenuti dall'Unità 5, con un'attrezzatura proposta per le prove in situ, sono ben allineati con il valore medio generale (linea rossa) per le lamine mentre sottostimano la resistenza nel caso dei tessuti. E' probabile che la maggiore rigidità delle lamine consenta un corretto allineamento rinforzo-martinetto e, quindi, un'esecuzione più corretta della prova, mentre nel caso dei tessuti un angolo non intenzionale di carico diverso da zero può causare o lo strappo del rinforzo o l'aumento della forza di strappo a causa della presenza di una componente di compressione non desiderata. Per valutare la variabilità dei risultati al variare del set-up adottato, del materiale e della lunghezza di ancoraggio, è stata calcolata la dispersione di ogni blocco di esperimenti. Nelle Fig. 12 a, b si riportano i coefficienti di variazione delle prove sui tessuti e sulle lamine. I risultati degli esperimenti condotti sulle lamine presentano una dispersione pressoché analoga fra le diverse unità, mentre per i tessuti la dispersione è più elevata, eccetto che per l'Unità 3 che ha ottenuto risultati stabili sia per lamine che per tessuti. Si noti, tuttavia, che la dispersione dei risultati è generalmente modesta (dell'ordine del 5-10%), decisamente inferiore a quella della resistenza a trazione del calcestruzzo, tipicamente stimata dell'ordine del 20-30%.

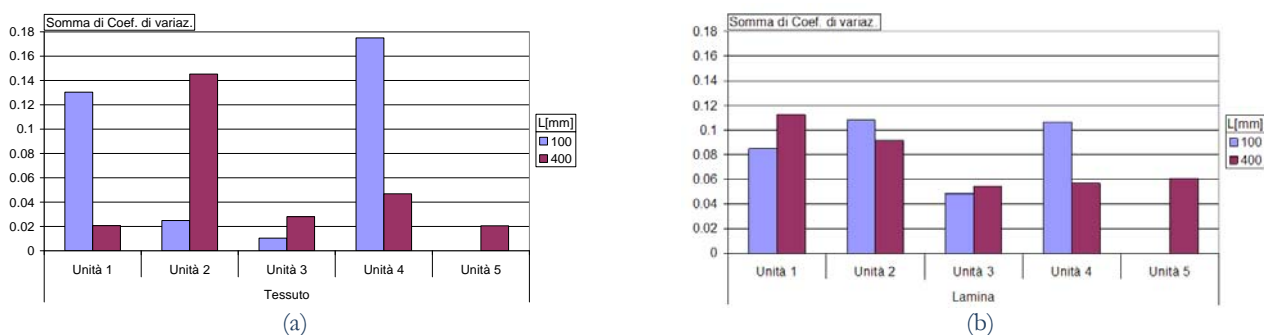


Figura 12: Coefficienti di variazione dei risultati delle prove di distacco: (a) su tessuti e (b) lamine

DIAGRAMMI FORZA-SPOSTAMENTO

Nel seguito, si riportano le curve forza applicata – allungamento ottenute da 3 Unità. Per le Unità 1 e 2, l'allungamento ΔL è stato valutato come la differenza fra lo spostamento all'inizio della parte di rinforzo incollata (LVDT 1) e quello dell'estremità opposta del rinforzo (LVDT 2). Per l'Unità 3, gli allungamenti non sono stati misurati attraverso LVDT ma calcolati a posteriori attraverso integrazione della deformazione misurata lungo il rinforzo.

Le Fig. 13 a-c mostrano le curve carico applicato – allungamento per i tre provini con tessuto di lunghezza di ancoraggio di 400 mm ottenute da ognuna delle tre Unità.

Si può osservare, per ogni laboratorio, la buona ripetibilità dei risultati ottenuti durante le prove in termini di rigidità, di spostamento relativo massimo e forza massima. Le curve fornite dall'Unità 2 (Fig. 13b) mostrano, durante la fase di distacco, dei brevi cicli di scarico e ricarica. Essi sono dovuti alla sensibilità della macchina di prova nel modificare il parametro di controllo della prova (si veda il paragrafo *Setup sperimentale – Unità 2*). Naturalmente tali scarichi non inficiano la prova in quanto l'involuppo della curva corrisponde ad un caricamento monotono del provino.

Confrontando i risultati ottenuti dai diversi laboratori, emerge, come già evidenziato, la soddisfacente concordanza dei risultati, sia in termini di capacità resistente ma anche di allungamento alla crisi (in media pari a 1.8 mm).

Analogamente, nelle Fig. 14 a-c, si riportano i risultati ottenuti dalle prove su lamine aventi lunghezza di ancoraggio di 400mm. Anche in questo caso si osserva una buona ripetibilità delle prove da parte di ogni unità. Per le lamine, a differenza dei tessuti, si osserva chiaramente un minore allungamento all'atto del distacco, dell'ordine di 0.6-0.8 mm.

Andamento delle deformazioni

Nelle Fig. 15-17, sono riportate alcuni esempi di distribuzioni di deformazioni longitudinali misurate lungo il tessuto per diversi livelli di carico, ottenute da tre diverse Unità (1, 3 e 4). I corrispondenti valori di forza applicata sono riportati nelle

legende. Le deformazioni per $x = 0$ corrispondono a quelle calcolate sulla base del valore della forza applicata ($\epsilon = F/E_f A_f$).

Le deformazioni nei tessuti sono molto regolari sia per bassi che per medi livelli di carico, mostrando un decadimento di tipo esponenziale a partire dalla sezione di applicazione del carico ($x=0$); questo andamento delle deformazioni corrisponde ad un comportamento sostanzialmente lineare dell'interfaccia. Per alti livelli di carico, invece, le deformazioni tendono ad essere pressoché costanti in prossimità della sezione caricata, da dove ha inizio il fenomeno di distacco tangenziale che poi si propagherà all'intera zona di ancoraggio (linee senza marker); dove il distacco non è ancora iniziato, è possibile osservare di nuovo un comportamento caratterizzato da decadimento esponenziale.

Confrontando i risultati ottenuti dai diversi laboratori, si può osservare come le Unità 1 e 3 siano in grado di seguire in modo stabile la propagazione della delaminazione lungo il provino.

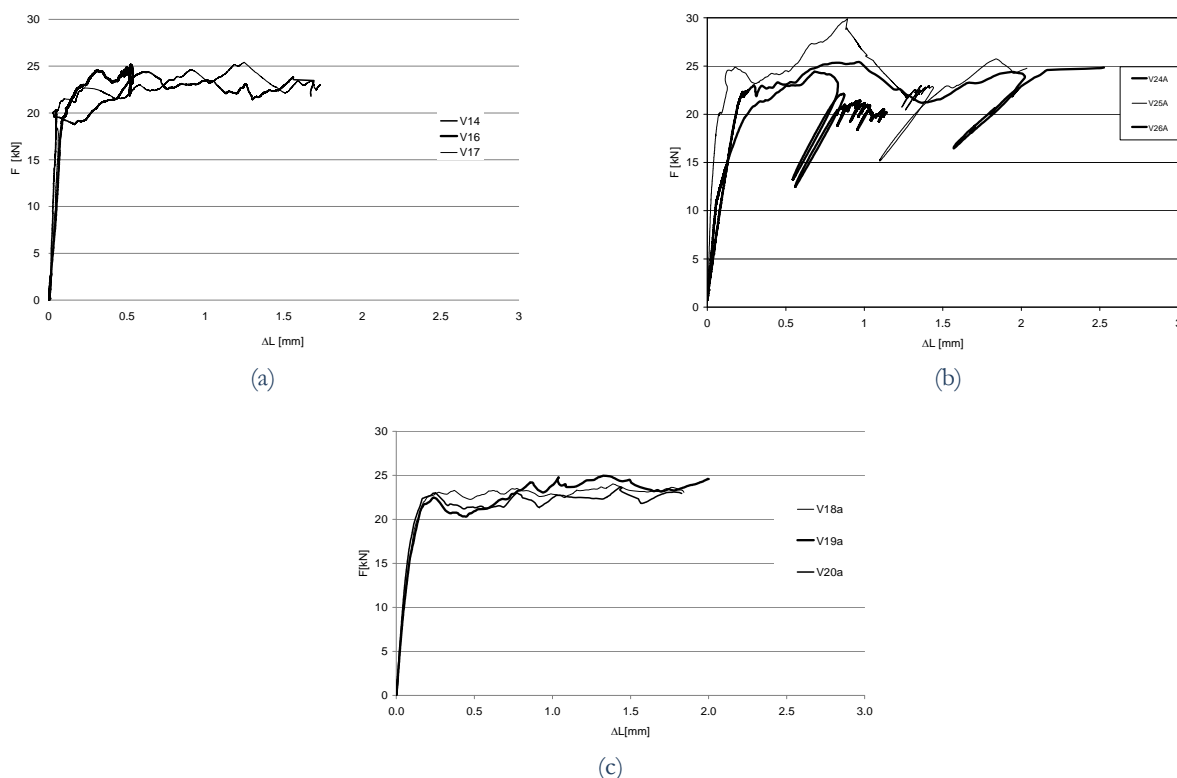


Figura 13: Tessuti con lunghezza di ancoraggio $L=400$ mm - Diagrammi Forza allungamento: (a) Unità 1; (b) Unità 2; (c) Unità 3.

CONCLUSIONI

Nella presente memoria sono state descritte le fasi di preparazione e di svolgimento di una estesa campagna sperimentale, impostata nello stile di un Round Robin, tesa a verificare l'effetto dell'impiego di set-up sperimentali diversi sulla resistenza al distacco tangenziale di rinforzi in FRP. A tal fine, un gruppo di prismi omogenei, rinforzati con lamine e tessuti per diverse lunghezze di ancoraggio, è stato sottoposto a prova di aderenza da Laboratori di alcune Università italiane, utilizzando set-up di prova tra loro differenti.

Sono stati presentati risultati in termini di forza di distacco, relazione forza-allungamento e distribuzione delle deformazioni lungo il rinforzo, per diversi valori della forza applicata.

Dai valori delle forze di distacco tangenziale, emerge un sostanziale accordo tra le prestazioni dei vari set-up considerati.

Le prove sulle lamine sono caratterizzate da una maggiore dispersione dei risultati ($Cov \cong 5 \div 10\%$), ma uniforme su tutti i laboratori; al contrario, i tessuti presentano dispersioni diverse anche all'interno dello stesso laboratorio, semplicemente cambiando lunghezza di ancoraggio. Questo suggerisce che per le prove sui tessuti sia da tenere in conto una maggiore sensibilità alle modalità di effettuazione della stessa.

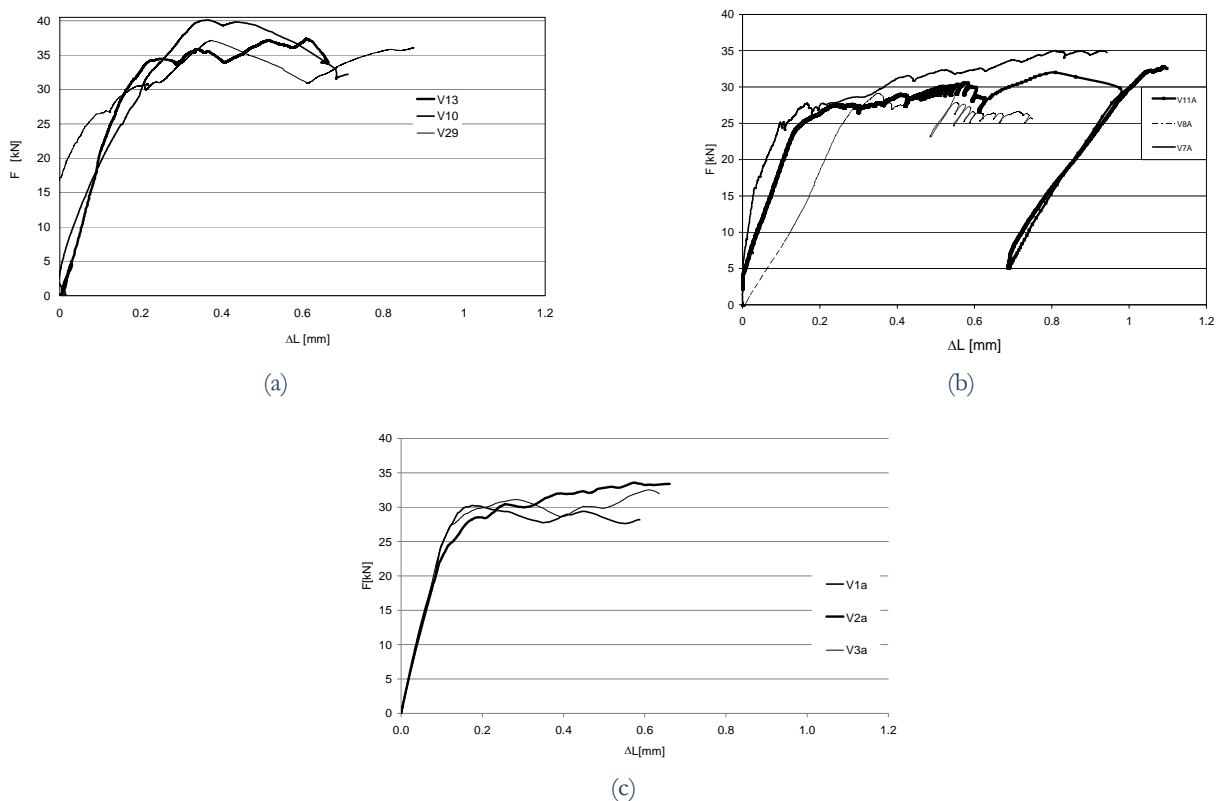


Figura 14: Lamine con lunghezza di ancoraggio $L=400$ mm - Diagrammi Forza spostamento: (a) Unità 1 mm; (b) Unità 2; (c) Unità 3.

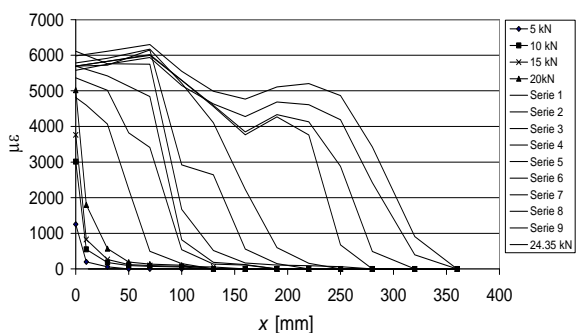


Figura 15: Unità 1: Andamento delle deformazioni lungo il provino (tessuto $L=400$ mm).

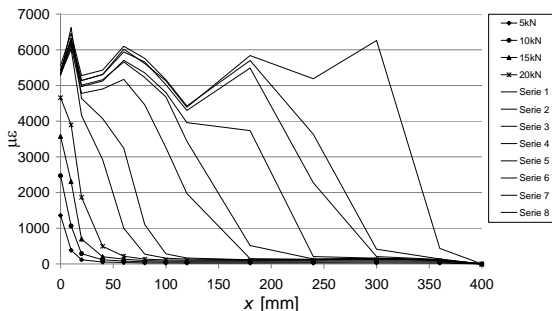


Figura 16: Unità 3: Andamento delle deformazioni lungo il provino (tessuto $L = 400$ mm).

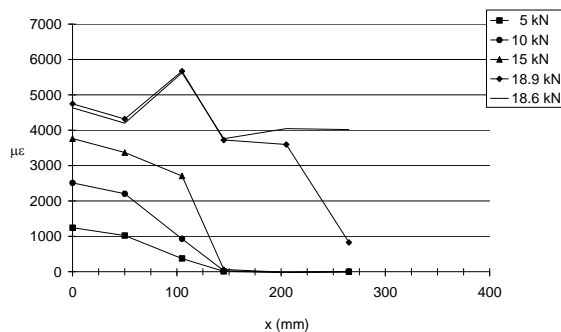


Figura 17: Unità 4: Andamento delle deformazioni lungo il provino (tessuto $L=400$ mm).



Dal confronto delle prestazioni è emerso anche l'importanza di evitare l'insorgere di flessioni parassite nel corso della prova che possano introdurre tensioni di peeling non trascurabile nel rinforzo. Queste sono utili indicazioni che ispireranno le future linee guida per l'adozione di un sistema standard di prova di aderenza in laboratorio.

Infine, il confronto con un'attrezzatura pensata per un impiego da cantiere ha consentito di evidenziare le buone prestazioni anche di sistemi semplificati; tuttavia, a conferma di quanto detto precedentemente, è emersa una maggiore sensibilità nel caso di prove su tessuti, dove probabilmente carenze di allineamento geometrico giocano un ruolo più significativo rispetto alle lamine.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano la Sika Italia S.p.A. e l'INTERBAU s.r.l. per la fornitura dei materiali e per l'applicazione dei rinforzi. Il lavoro è stato finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile attraverso il progetto Reluis 2005 linea 8: Materiali innovativi per la riduzione della vulnerabilità nelle strutture esistenti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Yao, J.G. Teng, J.F. Chen, *Composites Part B: Engineering*, 36(2) (2005) 99.
- [2] CNR: DT 200/2004 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati".
- [3] C. Poggi, G. Fava, Il controllo di accettazione di materiali fibrorinforzati per il rinforzo strutturale, I quaderni tecnici di Assocompositi.
- [4] X.Z. Lu, J.G. Teng, L.P. Ye, J.J. Jiang, *Engineering Structures*, 27 (6) (2005) 920.