

Strengthening of RC structures with SRP/SRG systems: bond tests

Rinforzo di strutture in c.a. con sistemi SRP/SRG: test di delaminazione

F. Ascione¹, C. Faella¹, M. Lamberti¹, A. Napoli¹, R. Realfonzo¹

¹ *Department of Civil Engineering, University of Salerno, Fisciano (SA), Italy*

ABSTRACT: Steel reinforced polymer (SRP) and steel reinforced grout (SRG) systems have recently been introduced in civil engineering for the external strengthening of RC members. Despite the unquestionable advantages deriving from the use of these systems, in terms of both performance and costs, the scientific papers available in literature are still limited, and there are several aspects related to their behaviour that need a better examination. Among them, the SRP/SRG-concrete bond is highlighted and this paper provides a contribute in this sense by presenting some results of 142 bond tests carried out at the University of Salerno. Particularly, tests have allowed for performing the first considerations on the SRP/SRG-concrete bond in terms of failure mode, debonding loads and effective bond lengths by varying the following parameters: concrete strength; bonded length; ratio between width of the adhesive strip and width of the reinforcement; steel tape density, and quality of the surface preparation. / I compositi SRP (“Steel Reinforced Polymer”) e SRG (“Steel Reinforced Grout”) sono stati recentemente introdotti nell’ingegneria civile per il rinforzo esterno di elementi in c.a. Nonostante gli indiscussi vantaggi derivanti dall’impiego di questi rinforzi, non solo prestazionali ma anche economici, i contributi scientifici reperibili in letteratura sono tuttora limitati e ci sono diversi aspetti comportamentali che richiedono ulteriore approfondimento. Tra questi si annovera sicuramente l’aderenza SRP/SRG-calcestruzzo e questa memoria fornisce un contributo in tale direzione presentando alcuni risultati di 142 test di delaminazione eseguiti presso l’Università di Salerno. In particolare, le prove hanno consentito di effettuare le prime considerazioni sull’aderenza SRP/SRG-calcestruzzo in termini di modalità di rottura, forze massime attese e lunghezze ottimali di ancoraggio al variare dei seguenti parametri: resistenza del calcestruzzo; lunghezza di ancoraggio del rinforzo; rapporto tra larghezza della striscia adesiva e larghezza del rinforzo; densità del tessuto in acciaio; tipo di preparazione del substrato.

KEYWORDS: steel cords; bond tests; polymeric and inorganic matrices / trefoli d’acciaio; test di delaminazione; matrici polimeriche e inorganiche

1 INTRODUZIONE

Nell’ultimo ventennio l’impiego di materiali polimerici fibro-rinforzati (FRP) per la riparazione ed il rinforzo di elementi strutturali in c.a. ha avuto un forte sviluppo sia in ambito scientifico che a livello industriale.

Da pochi anni, tuttavia, il crescente interesse nel settore dei compositi verso lo sviluppo di soluzioni innovative altrettanto “performanti” ma al tempo stesso economicamente vantaggiose, ha portato all’introduzione di sistemi per il rinforzo strutturale che fanno uso di reti di acciaio in sostituzione delle fibre di carbonio o di vetro.

Queste reti sono generalmente costituite da micro-trefoli d’acciaio ad alta resistenza tenuti assieme da una sottilissima rete in fibra di vetro o altro materiale che ne facilita l’installazione, andando a formare una sorta di tessuto unidirezionale; in commercio sono attualmente

disponibili tre diverse densità del tessuto (bassa, media, alta) in funzione del numero di trefoli presenti in una striscia di larghezza unitaria.

Come per gli FRP, l’impregnazione in situ dei trefoli può essere eseguita adoperando resine polimeriche (secondo la ben nota tecnica del “wet lay-up”) dando luogo ad un tipo di rinforzo noto con il termine “SRP” (acronimo di “*Steel Reinforced Polymer*”). Tuttavia, il tessuto ben si presta ad essere installato anche con matrici organiche ed in tal caso si parla di rinforzo “SRG” (acronimo di “*Steel Reinforced Grout*”); questa seconda soluzione si lascia preferire nel caso di applicazione su murature storiche per la reversibilità dell’intervento di rinforzo, o laddove si richiede un’elevata resistenza al fuoco.

Sebbene i primi studi risalgano al 2004, ad oggi i contributi scientifici riguardanti l’uso di compositi in fibra d’acciaio per il rinforzo di elementi in c.a. sono piuttosto limitati, così come il loro impiego nel

settore strutturale è fortemente condizionato dall'assenza di una normativa "ad-hoc".

Solamente negli ultimi anni si è registrato un certo interesse sia da parte dell'industria che della comunità scientifica verso uno studio più accurato dei sistemi SRP/SRG, certamente incentivato dalle ottime prestazioni meccaniche offerte oltre che dai costi di produzione e messa in opera del tutto competitivi.

A tal proposito, sebbene limitatamente ai rinforzi SRP, è stato recentemente pubblicato un ampio stato dell'arte di carattere sperimentale (De Santis et al., in press), che rappresenta un primo tentativo di fornire un quadro generale delle conoscenze finora acquisite e di evidenziare tutti gli aspetti non ancora esaminati o che richiedono ulteriore approfondimento. Tra quest'ultimi, l'aderenza calcestruzzo-composito SRP/SRG è stata una tematica solo marginalmente affrontata in ambito scientifico nonostante incida fortemente sulle prestazioni globali della struttura rinforzata. Com'è noto, infatti, la crisi per delaminazione è un meccanismo di rottura fragile che deve essere scongiurato nelle applicazioni pratiche, principalmente quando il rinforzo esterno viene impiegato per migliorare il comportamento a flessione e/o taglio dell'elemento strutturale.

Come si diceva pocanzi, in letteratura è possibile reperire pochissimi contributi riguardanti la valutazione del comportamento d'interfaccia SRP/SRG-calcestruzzo (Figeys et al. 2005, Matana et al. 2005, Mitolidis et al. 2008, Napoli et al. 2016). Di questi, inoltre, solo la memoria pubblicata da Matana et al. (2005) fornisce alcune considerazioni riguardanti l'aderenza tra tessuto SRG e calcestruzzo mentre gli altri articoli sono tutti incentrati sui rinforzi SRP (Figeys et al. 2005, Mitolidis et al. 2008, Napoli et al. 2016).

Lo studio qui presentato contribuisce in parte a colmare queste lacune della conoscenza illustrando i risultati salienti di una campagna sperimentale tuttora in corso presso il Laboratorio Ufficiale "Prove Materiali e Strutture" dell'Università di Salerno, svolta in collaborazione con il partner industriale "Kerakoll S.p.A." (Sassuolo, MO).

La matrice dei test include 142 prove di delaminazione eseguite, in controllo di spostamento, su reti in fibra d'acciaio rese aderenti a prismi di calcestruzzo mediante impiego di resine (sistema SRP) o malte (sistema SRG).

I risultati dei test condotti, alcuni dei quali sono stati già pubblicati in (Napoli & Realfonzo 2014, Napoli et al. 2016), hanno consentito di effettuare le prime considerazioni sull'aderenza SRP/SRG-calcestruzzo in termini di modalità di rottura, forze massime attese e lunghezze ottimali di ancoraggio al variare dei seguenti parametri: resistenza del calcestruzzo; lunghezza di ancoraggio del rinforzo; rapporto tra larghezza della striscia adesiva e larghezza del rinforzo; densità del tessuto in acciaio; tipo di preparazione del substrato.

2 PROGRAMMA SPERIMENTALE

Il programma sperimentale completo comprende l'esecuzione di 142 prove di delaminazione su rinforzi in fibra di acciaio adesi a prismi di calcestruzzo mediante uso di epossidico (sistema SRP) o matrice inorganica (sistema SRG). I test finora terminati sono 104 di cui 42 sono stati oggetto di una prima fase del programma sperimentale (conclusasi nel 2014); i risultati dei 42 test, ampiamente trattati in Napoli & Realfonzo (2014) e Napoli et al. (2016), saranno qui richiamati per una migliore comprensione dei risultati ottenuti dai nuovi test eseguiti.

La Figura 1 illustra la tipologia dei campioni sottoposti a test. Come si può osservare, i blocchi di calcestruzzo hanno dimensioni 200 x 150 x 400 mm e sono stati realizzati adoperando diverse miscele di calcestruzzo al fine di esaminare come gioca la resistenza del substrato sul comportamento in termini di aderenza. Nel caso in esame, si potrebbe dire che le miscele di calcestruzzo selezionate sono ascrivibili a due diverse classi di resistenza del calcestruzzo, identificate nel seguito con le sigle "NSC" ("Normal Strength Concrete") e "HSC" ("High Strength Concrete") in funzione del valore della resistenza cilindrica a compressione, f_{cm} . Nella classe NSC rientrano tutti i prismi di calcestruzzo caratterizzati da valori di f_{cm} inclusi nell'intervallo 15-30 MPa, mentre nella classe HSC sono radunati tutti i provini con valori di f_{cm} inclusi nell'intervallo 39-45 MPa.

Per la caratterizzazione della resistenza dei campioni di calcestruzzo sono state dapprima eseguite prove di compressione su provini cubici di lato 150 mm, prelevati al momento del getto dei campioni e conservati nelle medesime condizioni ambientali. Successivamente, una volta effettuati i test di delaminazione, sono state eseguite ulteriori prove di compressione sulle carote di calcestruzzo prelevate direttamente dai prismi.

Oltre a variare la classe di calcestruzzo e la tipologia della matrice d'impregnazione, le prove sono state condotte variando sia la lunghezza di ancoraggio (L_f = 100, 150, 200, 300, 350 mm) sia la densità (bassa, media, alta) della rete di rinforzo. Infine, ulteriori parametri esaminati stati il tipo di preparazione del supporto di calcestruzzo e il rapporto r tra la larghezza b_a della striscia adesiva (di natura polimerica o inorganica) e la larghezza b_f della rete di rinforzo, ossia: $b_a = b_f = 100$ mm o $b_a = 1.2 \cdot b_f = 120$ mm.

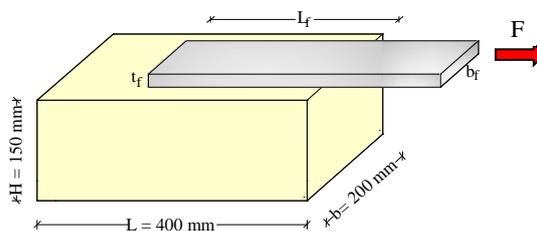


Figure 1. Schematic of test specimens. / Tipologia di campioni sottoposti al test.

2.1 Sistemi di rinforzo

I rinforzi SRP/SRG esaminati fanno uso di reti in trefoli d'acciaio ad alta resistenza prodotti da Hardware LLC (2016). Ciascun trefolo ha un'area effettiva (A_{tref}) di 0.538 mm^2 ed è costituito da 5 filamenti, aventi ciascuno un'area di 0.11 mm^2 ; 3 filamenti sono rettilinei mentre gli altri 2 avvolgono i precedenti con un elevato angolo di avvolgimento (da qui la sigla comunemente adottata di trefolo "3x2"). I trefoli sono galvanizzati per una migliore resistenza alla corrosione e sono installati su una rete di fibra di vetro non strutturale che ne facilita la posa e al tempo stesso la lavorabilità del tessuto.

In base al numero di trefoli presenti in una striscia di larghezza unitaria, esistono diverse densità ρ del tessuto. In questo studio sono state esaminate tre diverse densità, contrassegnate dal fornitore (Kerakoll 2016) con le sigle "GeoSteel G600", "GeoSteel G2000" e "GeoSteel G3300"; il numero in ciascuna sigla indica, in via approssimativa, il peso del tessuto in g/m^2 . Per semplicità, le tre densità sono indicate nel seguito come "LD" ("low density"), "MD" ("medium density") e "HD" ("high density"), ossia bassa ($\rho = 0.157$ trefoli/mm), media ($\rho = 0.472$ trefoli/mm) e alta densità ($\rho = 0.709$ trefoli/mm).

In un articolo recentemente pubblicato dagli autori (Realfonzo et al. 2016) è possibile reperire le principali proprietà meccaniche delle reti utilizzate; tali proprietà sono state ricavate da numerose prove di trazione eseguite su campioni di tessuto secco, ampiamente commentate in Napoli et al. (2016).

Per quanto riguarda le matrici impiegate per l'impregnazione del tessuto, si evidenzia che nel caso del sistema SRG è stata selezionata una speciale malta (commercializzata come il termine "Geolite") caratterizzata da un bassissimo contenuto di polimeri petrolchimici, esente da fibre organiche; nel caso del sistema SRP, invece, è stato adoperato un adesivo minerale epossidico in gel tixotropico (commercializzato con il termine "Geolite Gel").

Le principali proprietà meccaniche degli adesivi selezionati possono essere dedotte dal materiale informativo che il produttore rende disponibile "online" (Kerakoll 2016).

2.2 Matrice dei test ed applicazione dei rinforzi

La Figura 2 illustra in maniera semplificata la struttura dell'intero programma di prove messo a punto con l'indicazione del numero di test previsto in corrispondenza di ciascun parametro esaminato.

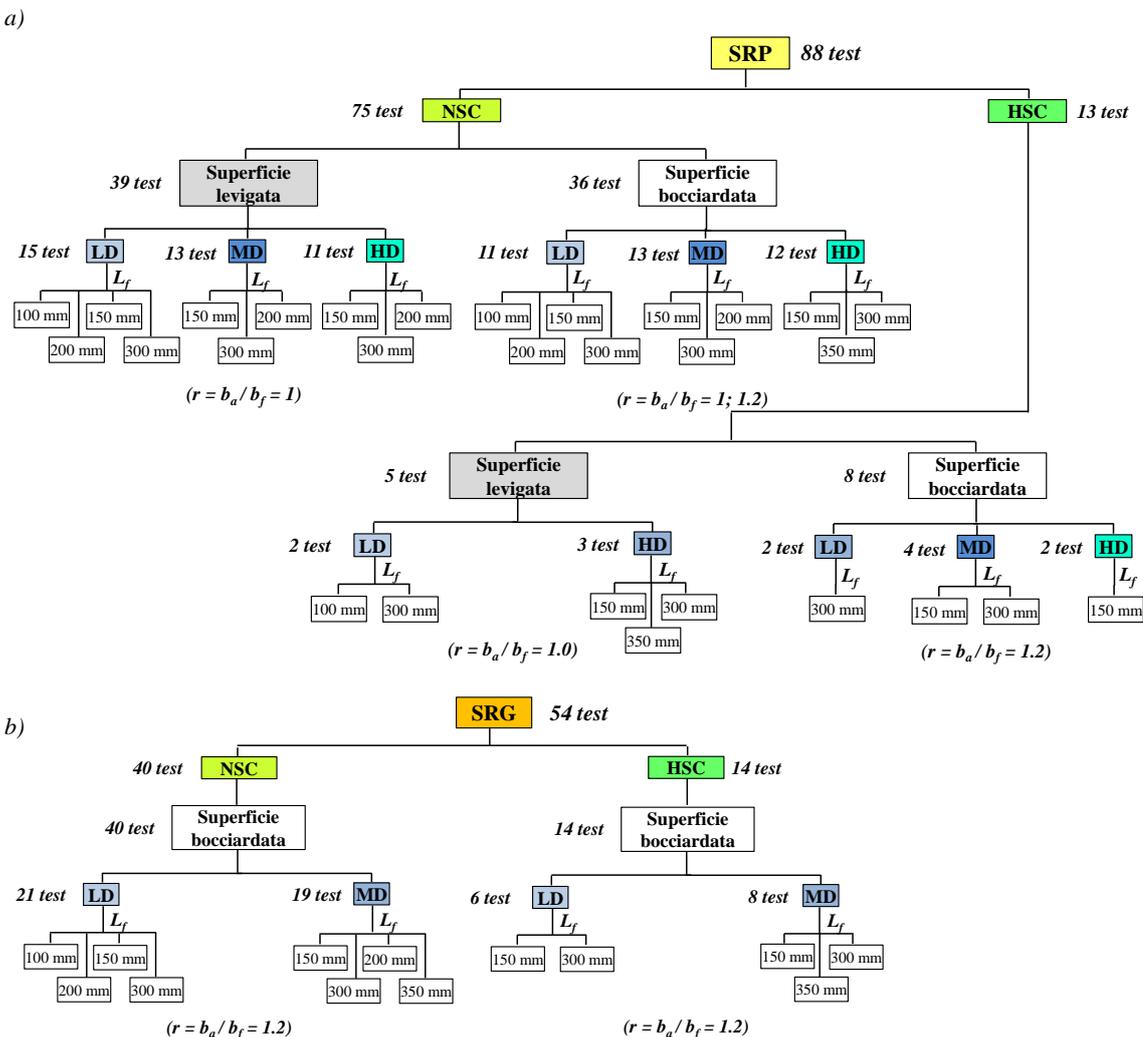


Figure 2. Test matrix: SRP systems (a); SRG systems (b). / Matrice dei test: sistemi SRP (a); sistemi SRG (b).

Come si può osservare, 88 sono le prove di delaminazione previste nel caso dei rinforzi SRP e 54 quelle relative ai rinforzi SRG, per un totale di ben 142 test; la gran parte di essi coinvolge substrati di calcestruzzo appartenenti alla classe NSC.

Come già detto in precedenza, il programma sperimentale è in corso di completamento ed al momento sono disponibili i risultati dei primi 104 test.

Al fine di studiare come gioca la minore o maggiore cura riposta nel trattamento superficiale del substrato di calcestruzzo, nel caso dei sistemi SRP sono stati presi in considerazione due tipi di preparazione, ossia: il trattamento eseguito mediante levigatura (Figs. 3a, b) e quello che prevede la bocciardatura (Figs. 3c, d) della superficie. Il trattamento con bocciardatrice meccanica, costituita da una punta dentata montata su un piccolo martello pneumatico, consente una lavorazione più accurata del substrato, garantendo un più efficace ingranamento tra il substrato stesso e la rete metallica.

Indipendentemente dalla classe di resistenza del calcestruzzo e dal tipo di trattamento superficiale, nel caso dei sistemi SRP sono state esaminate tutte e tre le densità del tessuto; nel caso dei rinforzi SRG, invece, sono state prese in considerazione solo la bassa e la media densità perché garantiscono una migliore impregnazione del tessuto e quindi una maggiore aderenza. Inoltre, a parità di densità del tessuto, sono stati eseguiti numerosi test al variare della lunghezza di ancoraggio del rinforzo (L_f variabile da 100 a 350 mm).

Infine, come già detto in precedenza, è stato preso esaminato anche il parametro $r = b_a/b_f$. In particolare, $r = 1.2$ è stato il valore maggiormente considerato nel programma sperimentale; tuttavia, specialmente nel caso dei rinforzi SRP su supporti in calcestruzzo del tipo NSC, numerosi test sono stati condotti fissando $r = 1.0$ al fine di esaminare una possibile riduzione delle forze di “debonding” nel caso di un valore più basso di questo parametro.



Figure 3. Grinded (a,b) and bush hammered surface (c,d). / Levigatura (a,b) e bocciardatura della superficie (c,d).

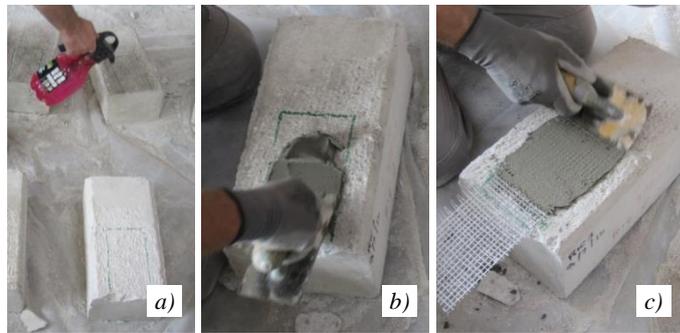


Figure 4. Some application steps of SRG reinforcement (a,b,c). / Alcune fasi applicative del rinforzo SRG (a,b,c).

La Figura 4 illustra alcune fasi di applicazione del rinforzo SRG sul calcestruzzo dopo averne preparato accuratamente la superficie mediante una “bocciardatrice meccanica” (si vedano le Figs. 3c, d).

Prima della messa in opera del geolite – al fine di garantire che la fibra fosse completamente ricoperta dalla matrice – è stata predisposta una sagoma con dime perimetrali dello spessore di circa 5 mm ed avente come base un rettangolo di larghezza 120 mm e lunghezza variabile in funzione del valore L_f .

Dopo avere preparato la sagoma, la superficie di calcestruzzo è stata abbondantemente bagnata con acqua (Fig. 4a) per poi ospitare il primo strato di geolite (Fig. 4b). Inserito il tessuto in acciaio, è stato quindi predisposto un secondo strato di ricoprimento (Fig. 4c). Al termine delle suddette operazioni, lo strato superiore del pacchetto è stato nuovamente bagnato e, successivamente, il provino rinforzato è stato avvolto all’interno di un “tessuto non tessuto” ed un telo di plastica al fine di garantire la maturazione della malta in ambiente umido.

L’applicazione del sistema SRP non ha previsto l’impregnazione con acqua della superficie di calcestruzzo, la predisposizione delle dime, e la protezione del provino rinforzato.

Per entrambi i sistemi, al fine di evitare “l’effetto bordo”, l’incollaggio del rinforzo è iniziato a circa 30 mm da una delle estremità del provino di calcestruzzo, ossia quella corrispondente all’estremità caricata della striscia di rinforzo.

2.3 Set-up di prova

I test sono stati eseguiti in controllo di spostamento (velocità di prova = 0.01 mm/sec) utilizzando una macchina universale Schenk da 600 kN ed uno schema di prova del tipo “single lap”.

Informazioni specifiche sul set-up, non riportate in questa memoria per ragioni di sintesi, sono contenute in Realfonzo et al. (2016).

Si evidenzia, tuttavia, che nel corso della sperimentazione il set-up di prova ha subito delle modifiche consistite nella diversa disposizione della strumentazione dei provini. In particolare, in una prima fase della sperimentazione, lo scorrimento all’estremità caricata del rinforzo SRP/SRG è stato misurato di-

rettamente attraverso un sensore laser; una misura ulteriore di tale scorrimento è stata ricavata indirettamente utilizzando lo spostamento imposto alla macchina di prova e sottraendovi l'allungamento elastico della porzione di rinforzo non incollata (≈ 140 mm) che termina poi nel sistema di afferraggio della macchina. Inoltre, nel corso dei primi test sono stati predisposti altri due trasduttori laser, uno per monitorare lo scorrimento all'estremità libera del rinforzo e l'altro per controllare lo spostamento in corrispondenza del sistema di afferraggio (onde scongiurare la presenza di eventuali scorrimenti).

Nel corso della seconda fase del programma sperimentale, invece, lo scorrimento all'estremità caricata del rinforzo è stato misurato direttamente mediante due potenziometri; la misura indiretta, invece, è stata effettuata sia mediante lo spostamento macchina come su descritto, sia attraverso la misura di due sensori laser e sottraendovi sempre l'allungamento di una porzione di rinforzo non incollata. Inoltre, lo scorrimento all'estremità libera del rinforzo è stato misurato mediante un altro laser.

3 RISULTATI SPERIMENTALI

Le Tabelle 1a, b e 2 sintetizzano i principali risultati di 62 su 104 test finora eseguiti, di cui 47 su rinforzi SRP (si vedano le Tabelle 1a, b) e 15 su rinforzi SRG (si veda la Tabella 2). Per i sistemi SRP, 31 test sono stati eseguiti su supporti di calcestruzzo dove la preparazione della superficie è stata effettuata mediante levigatura (Tabella 1a), mentre i rimanenti 16 test sono stati eseguiti su supporti di calcestruzzo bocciardati (Tabella 1b). Dei 31 test, solamente 5 sono stati eseguiti su substrati di calcestruzzo del tipo HSC, mentre i 16 test eseguiti su superfici bocciardate appartengono tutti alla classe NSC. Per i sistemi SRG, tutti adesi a superfici di calcestruzzo bocciardate, solo 2 test sono stati eseguiti all'interno della classe HSC.

Ovviamente, ai 62 test in considerazione, occorre aggiungere i 42 della prima fase della sperimentazione, i cui risultati sono commentati in un articolo recentemente pubblicato (Realfonzo et al. 2016).

Ciascun test è contraddistinto da una sigla del tipo " x -YD#z" dove: " x " indica la lunghezza L_f del rinforzo in cm, " Y " ne identifica la densità (L = "low"; M = "medium"; H = "high"), " z " indica il numero progressivo del test (in genere variabile da 1 a 5) all'interno di una serie di provini identici.

Oltre a riportare il valore del succitato parametro r , le Tabelle 1 e 2 forniscono le seguenti informazioni:

- ✓ il carico di "debonding" (F_{max}) e la tensione corrispondente nel rinforzo ($\sigma_{max} = F_{max}/(t_f \cdot b_f)$);
- ✓ il carico di "debonding" per unità di larghezza della striscia adesiva (F_{max}/b_a);
- ✓ i valori dello scorrimento all'estremità caricata del rinforzo disponibili in corrispondenza del picco massimo della forza (spostamenti s_m, s_{c1} ,

s_{c2}) e al raggiungimento della condizione ultima (spostamenti $s_{u,m}, s_{u,c1}, s_{u,c2}$). Si ricorda che questi valori sono stati: *i*) misurati direttamente mediante i due potenziometri e facendone la media (spostamenti s_m ; $s_{u,m}$), *ii*) ricavati indirettamente a partire dallo spostamento imposto alla macchina di prova (spostamenti s_{c2} ; $s_{u,c2}$) e dalle letture medie fornite da due sensori laser (spostamenti s_{c1} ; $s_{u,c1}$). Ovviamente, scongiurando un qualsiasi tipo di malfunzionamento degli strumenti di misura o la presenza di scorrimenti indesiderati all'afferraggio, i valori degli spostamenti ottenuti mediante metodo "diretto" o "indiretto" dovrebbero essere pressochè analoghi;

- ✓ il tipo di rottura osservata (si veda a tal proposito la Fig. 5), ossia: delaminazione all'interno del calcestruzzo (CD), delaminazione all'interno dell'adesivo (MD), danneggiamento o rottura dei trefoli di acciaio (SD o SR, rispettivamente) nella porzione del rinforzo prossima all'afferraggio, talvolta accompagnato dalla delaminazione dello stesso.

Infine, nel caso della rottura per delaminazione, l'ultima colonna riporta informazioni sul tipo di risposta sperimentale carico-scorrimento osservata, contraddistinta con le sigle (a), (b), (c) e (d). Questi 4 diversi comportamenti, illustrati nella Figura 6a, consentono di effettuare una stima approssimativa della lunghezza efficace di ancoraggio del rinforzo L_e al variare dei parametri di interesse.

La risposta "tipo (a)", attesa per $L_f \leq L_e$ è certamente la più fragile e si verifica quando il rinforzo non ha possibilità di trasferire le tensioni interfacciali verso zone adiacenti; in questo caso, il distacco del rinforzo avviene bruscamente e si attiva per un valore dello scorrimento coincidente con quello misurato in corrispondenza del picco di forza.

Le risposte "tipo (b)" e "tipo (c)", attese per valori di L_f poco più grandi di L_e , si manifestano quando il rinforzo presenta una certa (seppur limitata) capacità di trasferimento delle azioni interfacciali. In tal caso, la delaminazione si attiva prima all'estremità caricata del rinforzo per poi propagarsi leggermente verso quella libera. Tuttavia, la curva "tipo (b)" si ottiene quando la delaminazione si estende verso aree caratterizzate da una maggiore resistenza, tanto da produrre un incremento del carico; di conseguenza, il distacco del rinforzo si manifesta per un valore dello scorrimento pari a quello corrispondente a F_{max} .

La curva "tipo (c)", caratterizzata dalla presenza di decrementi di carico, è tipica di una delaminazione che si propaga verso aree a minore resistenza, tanto da produrre una riduzione del carico; di conseguenza, il completo distacco del rinforzo si manifesta per un valore dello scorrimento maggiore di quello al raggiungimento di F_{max} .

La risposta "tipo (d)", attesa per $L_f \gg L_e$, è

caratterizzata da una sorta di plateau in termini di resistenza, evidenziando un fenomeno esteso di delaminazione che si propaga ampiamente verso l'estremità libera del rinforzo; in tal caso, lo scorrimento ultimo è molto più grande di quello esibito in corrispondenza del carico massimo.

Per quanto concerne il danneggiamento/rottura

dei trefoli, osservata solo in alcune prove eseguite sui rinforzi SRP/SRG a bassa densità, la Figura 6b ne illustra la tipica curva carico-scorrimento; tale curva è caratterizzata da piccoli decrementi di carico osservati in prossimità del raggiungimento del picco di forza e nella fase post-picco, la cui frequenza è pari al numero di trefoli danneggiati o rotti.

Table 1a. Results of bond tests of SRP tapes on concrete: “grinded” surface / Risultati dei test di delaminazione sui rinforzi SRP: superficie del calcestruzzo “levigata”.

Serie	Test	f_{cm} MPa	r –	F_{max} kN	σ_{max} MPa	F_{max}/b_a kN/m	s_m mm	s_{um} mm	s_{c1} mm	$s_{u,c1}$ mm	s_{c2} mm	$s_{u,c2}$ mm	FM –
NSC	10LD#1	22.0	1.0	10.74	1278.6	107.40	0.23	–	0.99	1.28	1.10	1.23	CD-(c)
	15LD#1	29.7		13.51	1608.4	135.10	0.84	0.84	–	–	1.87	2.60	CD-(c)
	15LD#2	29.7	1.0	11.39	1355.7	113.88	0.93	1.09	–	–	1.76	1.87	CD-(a)
	15LD#3	29.7		10.89	1296.4	108.90	0.26	0.60	–	–	1.94	2.02	CD-(a)
	20LD#1	29.7		9.62	1145.5	96.22	0.83	1.43	–	–	0.62	1.08	CD-(c)
	20LD#2	29.7	1.0	12.82	1525.7	128.16	0.53	1.16	–	–	1.53	2.26	CD-(d)
	20LD#3	29.7		11.90	1417.1	119.03	0.50	1.75	–	–	0.59	1.21	CD-(c)
	30LD#1	22.0		14.72	1752.4	147.20	2.38	3.05	1.64	2.20	1.92	2.34	CD-(d)
	30LD#2	29.7	1.0	10.83	1289.5	108.32	0.79	1.61	2.10	2.72	0.92	1.71	CD-(c)
	30LD#3	29.7		12.95	1542.2	129.55	2.06	2.16	–	–	3.29	3.42	CD-(b)
	15MD#1	22.0		14.74	580.3	147.40	–	–	0.44	0.74	0.52	0.72	CD-(c)
	15MD#2	22.0	1.0	16.76	660.0	167.64	–	–	0.25	0.25	0.83	0.83	CD-(a)
	15MD#3	29.7		14.05	553.0	140.46	0.21	0.36	–	–	1.21	1.44	CD-(c)
	20MD#1	29.7		14.28	562.4	142.84	0.34	0.68	0.39	0.90	1.34	1.74	CD-(c)
	20MD#2	29.7	1.0	18.71	736.5	187.08	0.59	0.93	0.40	0.86	1.59	1.97	CD-(c)
	20MD#3	22.0		21.05	828.7	210.49	0.69	0.69	0.59	0.59	1.65	1.65	CD-(b)
	30MD#1	22.0		19.46	766.2	194.62	0.95	1.33	0.37	0.73	1.45	1.66	CD-(c)
	30MD#2	22.0	1.0	19.38	763.1	193.83	–	–	–	–	1.35	2.42	CD-(c)
	30MD#3	22.0		20.93	824.0	209.30	–	–	–	–	0.97	0.97	CD-(b)
	15HD#1	22.0		17.70	464.5	176.96	0.48	0.48	0.51	0.51	1.36	1.36	CD-(a)
15HD#2	22.0	1.0	14.78	387.9	147.80	1.17	1.17	0.62	0.62	0.61	0.61	CD-(a)	
30HD#1	22.0		21.11	554.0	211.09	0.41	1.14	0.26	0.92	0.51	0.98	CD-(d)	
30HD#2	29.7	1.0	25.33	664.9	253.34	0.32	0.61	–	–	1.38	1.73	CD-(c)	
30HD#3	29.7		19.22	504.5	192.20	0.25	1.29	0.38	0.83	1.54	1.93	CD-(c)	
35HD#1	29.7		16.16	424.9	161.89	0.37	0.37	–	–	2.19	2.22	CD-(b)	
35HD#2	29.7	1.0	16.60	436.4	166.25	0.72	–	–	–	1.78	2.29	CD-(c)	
HSC	10LD#1	44.9	1.0	20.79	2475.0	207.90	0.12	–	0.61	1.17	1.94	2.32	CD-(a)
	30LD#1	44.9	1.0	20.37	2425.5	203.75	3.88	3.88	3.30	3.30	3.26	3.26	CD-(b)
	15HD#1	44.9	1.0	26.62	698.7	266.20	0.21	0.21	0.73	0.73	1.65	1.65	CD-(b)
	30HD#1	44.9	1.0	34.98	918.0	349.76	1.13	1.57	0.78	1.12	1.62	1.84	CD-(b)
	35HD#3	44.9	1.0	36.66	962.3	366.62	1.40	1.79	1.21	1.54	2.66	2.83	CD-(c)

Table 1b. Results of bond tests of SRP tapes on concrete: “bush hammered” surface / Risultati dei test di delaminazione sui rinforzi SRP: superficie del calcestruzzo “bocciardata”.

Serie	Test	f_{cm} MPa	r –	F_{max} kN	σ_{max} MPa	F_{max}/b_a kN/m	s_m mm	s_{um} mm	s_{c1} mm	$s_{u,c1}$ mm	s_{c2} mm	$s_{u,c2}$ mm	FM –
NSC	10LD#1	29.7		15.28	1819.0	152.80	–	–	0.50	0.50	1.62	1.76	CD-(a)
	10LD#2	29.7	1.0	13.16	1566.7	131.60	–	–	–	–	–	–	CD-(c)
	15LD#1	29.7		12.76	1518.6	127.56	–	–	1.59	1.91	3.07	3.31	CD-(b)
	15LD#2	29.7	1.0	15.28	1818.6	152.76	–	–	0.44	0.90	1.22	1.61	CD-(c)
	15LD#3	29.7		19.78	2354.7	197.79	–	–	0.38	0.38	1.87	2.43	CD-(c)
	20LD#1	29.7		14.66	1745.3	146.61	–	–	1.57	1.77	3.78	3.91	CD-(b)
	20LD#2	29.7	1.0	14.74	1754.8	147.40	–	–	1.29	1.42	2.76	2.79	CD-(b)
	30LD#3	29.7		14.15	1683.9	141.45	–	–	–	–	4.41	4.55	CD-(b)
	30LD#4	29.7	1.0	17.36	2066.5	173.59	–	–	1.98	2.45	2.89	3.46	CD-(d)
	15MD#3	29.7	1.0	21.90	862.3	219.02	0.54	0.63	–	–	2.31	2.35	CD-(a)
	20MD#1	29.7		22.02	867.0	220.21	–	–	–	–	2.55	2.59	CD-(a)
	20MD#2	29.7	1.0	19.83	780.7	198.30	–	–	–	–	–	–	CD-(a)
	15HD#3	22.0	1.0	18.11	475.4	181.13	–	–	0.40	0.40	1.21	1.21	s-CD
	30HD#3	29.7	1.0	22.93	601.9	229.34	0.93	0.93	0.97	0.97	1.53	1.53	CD-(b)
	35HD#1	29.7		30.16	791.5	301.55	1.51	1.52	1.52	1.52	2.38	2.38	CD-(b)
35HD#2	29.7	1.0	21.82	572.8	218.23	0.47	0.75	–	–	1.17	1.72	CD-(c)	

Table 2. Results of bond tests of SRG tapes on concrete: “bush hammered surface” / Risultati dei test di delaminazione sui rinforzi SRG: superficie del calcestruzzo “bocciardata”.

Serie	Test	f_{cm} MPa	r –	F_{max} kN	σ_{max} MPa	F_{max}/b_a kN/m	s_m mm	s_{um} mm	s_{c1} mm	$s_{u,c1}$ mm	s_{c2} mm	$s_{u,c2}$ mm	FM –
NSC	10LD#1	22.0		17.91	2132.7	149.29	0.87	0.87	1.61	1.61	1.93	1.93	CD-(a)
	10LD#2	22.0	1.2	21.58	2569.6	179.87	–	–	0.93	0.93	2.87	2.87	CD-(a)
	10LD#3	22.0		15.57	1854.0	129.78	0.94	0.94	0.65	0.65	1.13	1.13	CD-(a)
	15LD#3	22.0	1.2	22.28	2652.3	185.66	–	–	1.03	1.76	2.21	3.14	CD-(c)
	20LD#1	22.0		17.40	2071.3	144.99	1.40	2.32	2.37	3.30	2.70	3.50	CD-(d)
	20LD#2	22.0	1.2	18.41	2191.7	153.42	1.26	1.26	1.66	1.66	3.84	3.84	CD-(b)
	30LD#4	22.0		24.68	2938.0	205.66	3.83	5.03	3.67	4.42	4.70	6.19	SR
	30LD#5	22.0	1.2	24.18	2879.0	201.53	2.89	4.55	3.59	5.38	4.34	4.55	SR
	15MD#4	22.0	1.2	15.59	613.9	129.94	0.69	0.83	0.27	0.37	1.22	1.30	CD-(a)
	20MD#1	22.0		20.67	813.9	172.27	0.73	0.73	0.59	0.59	1.78	1.78	MD-(a)
	20MD#2	22.0	1.2	18.91	744.3	157.55	0.40	0.40	0.46	0.46	1.68	1.68	MD-(a)
	30MD#4	22.0	1.2	19.72	776.4	164.33	–	–	–	–	1.74	1.74	CD/MD-(a)
	35MD#1	22.0	1.2	22.50	885.7	187.48	–	–	0.74	0.82	2.52	2.60	MD-(a)
HSC	15MD#4	44.9	1.2	18.01	709.2	150.11	–	–	0.38	0.38	1.42	1.42	MD-(a)
	35MD#1	44.9	1.2	20.22	795.9	168.47	1.58	1.58	1.16	1.16	2.15	2.15	MD-(a)

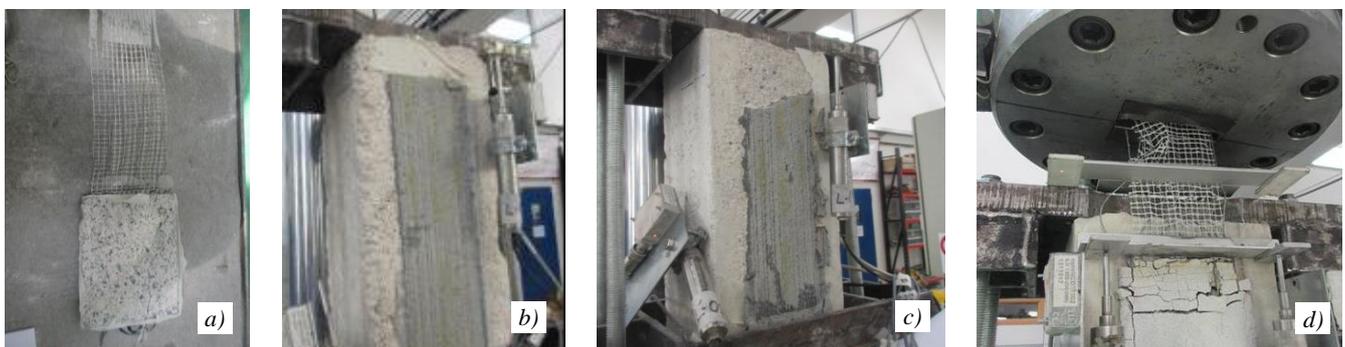


Figure 5. Typical failure mode: CD (a); MD (b); CD/MD (c); SR (d). / Tipiche modalità di rottura: CD (a); MD (b); CD/MD (c); SR (d).

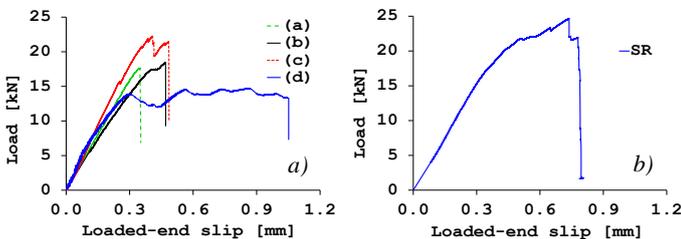


Figure 6. Shape of the load-slip responses: debonding failure (a); steel cords rupture (b). / Andamento delle curve carico-scorrimento: delaminazione (a); rottura dei trefoli (b).

3.1 Aderenza calcestruzzo-rinforzo SRP

I test sui rinforzi SRP hanno evidenziato un comportamento in termini di aderenza del tutto assimilabile a quello osservato nel caso dei sistemi in FRP; la crisi è avvenuta sempre per delaminazione del rinforzo all'interno del supporto di calcestruzzo, accompagnata dalla rimozione di uno spessore di 2-3 mm di materiale superficiale.

Inoltre, i test hanno sottolineato l'importanza di garantire un'accurata preparazione della superficie di calcestruzzo, lasciando prediligere la bocciardatura alla più immediata levigatura. Infatti, confrontando test analoghi nelle Tabelle 1a e 1b, ossia differenziati solo per il tipo di preparazione del substrato, è possibile notare incrementi di carico in presenza di bocciardatura superiori anche del 15%

rispetto al caso della levigatura.

Tuttavia, la maggiore o minore cura nella preparazione della superficie non sembra influire in maniera significativa sul valore della lunghezza efficace del rinforzo L_e . Infatti, dai test riportati nelle Tabelle 1a e 1b ad $r=1$ sembrerebbe che, nel caso dei tessuti LD, valori di L_f contenuti nell'intervallo 100-150 mm sono sufficienti a garantire l'attingimento del carico massimo consentito; al crescere della densità del tessuto (reti MD/HD), invece, la lunghezza efficace di ancoraggio sembrerebbe attestarsi intorno ai 200 mm.

Il parametro r , generalmente non considerato nelle valutazioni riguardanti l'aderenza, ha invece una sua influenza; infatti, confrontando i test riportati nella Tabella 1b con analoghi test eseguiti nella prima fase del programma sperimentale ma caratterizzati da $r = 1.2$ (Realfonzo et al. 2016), si osserva una differenza in termini di forze di distacco anche dell'ordine del 20% (i valori più alti sono registrati nel caso di $r = 1.2$). Occorre però far notare che la bocciardatura eseguita sui provini con $r = 1.2$ era qualitativamente migliore di quella dei nuovi prismi; tale aspetto potrebbe aver inciso sul 20%.

Infine, anche la classe di calcestruzzo gioca un suo ruolo, fino a far duplicare i valori di F_{max} nel passare dalla classe NSC a quella HSC; a tal proposito è possibile confrontare i test della Tabella

1b con quelli analoghi pubblicati in Realfonzo et al. (2016), appartenenti alla classe HSC.

3.2 Aderenza calcestruzzo-rinforzo SRG

I test sui rinforzi SRG, soprattutto quelli eseguiti sulle reti MD, hanno evidenziato un comportamento in termini di aderenza generalmente differente da quello osservato per i sistemi SRP; la delaminazione si è generalmente manifestata all'interno della matrice inorganica (Fig. 5b), talvolta accompagnata anche da quella nel calcestruzzo (Fig. 5c).

In conseguenza di ciò, essendo il comportamento complessivo governato dalla malta, la resistenza del supporto assume un ruolo marginale. Tale considerazione è confermata dai risultati dei test riportati in Tabella 2 e da quelli pubblicati in Realfonzo et al. (2016), da cui si evince che la distinzione tra le classi NSC e HSC potrebbe essere in tal caso by-passata.

Tuttavia, soprattutto i provini LD appartenenti alla seconda parte della sperimentazione hanno di frequente esibito la rottura per debonding all'interno del calcestruzzo (Fig. 5a), analoga a quella dei rinforzi SRP. Questa evidenza sperimentale, che ovviamente necessita di ulteriori conferme nei prossimi test a svolgersi, potrebbe trovare una duplice giustificazione, ossia: *a*) nella particolare configurazione del tessuto a bassa densità, con trefoli piuttosto distanziati, che consente alla matrice inorganica di creare una maggiore adesione con le fibre; *b*) nella maggiore attenzione posta in laboratorio durante il periodo di stagionatura della malta con riguardo ai provini della seconda fase del programma sperimentale. A tal proposito, infatti, su specifica richiesta del partner industriale, la superficie dei provini ospitante il rinforzo SRG è stata periodicamente bagnata con acqua al fine di garantire la maturazione della malta in ambiente umido. Ciò ha comportato, da un lato, un evidente incremento dei carichi F_{max} rispetto ai valori registrati per provini analoghi nella prima fase della sperimentazione, dall'altro lato, una maggiore probabilità di accadimento della rottura CD (osservata anche per alcuni rinforzi MD).

Indipendentemente dal tipo di rottura osservata, i test hanno evidenziato un comportamento decisamente più performante nel caso dei rinforzi LD rispetto a quelli MD; questa osservazione è ulteriormente confermata nei valori calcolati delle tensioni σ_{max} che sono più elevati nel caso dei tessuti LD.

Infine, per quanto riguarda la lunghezza efficace di ancoraggio, si può affermare in via preliminare che, nel caso dei tessuti LD, tale valore si aggira intorno ai 150-300 mm, mentre nel caso dei tessuti MD esso tende ad avvicinarsi ai 300 mm circa.

4 CONCLUSIONI

The paper presented some results of shear bond tests

on SRP/SRG systems bonded to concrete. The results highlighted the different role of the considered parameters (substrate strength, nature of the adhesive and respective application, bond length and quality of concrete surface preparation) on the bond behavior. The obtained considerations represent a first step toward the development of design formulae for the bond behavior of SRP/SRG systems.

In questo lavoro sono stati presentati alcuni risultati di test di delaminazione eseguiti su rinforzi SRP/SRG adesi a prismi di calcestruzzo. I risultati hanno consentito di evidenziare il ruolo giocato sull'aderenza da ciascun parametro esaminato (resistenza del calcestruzzo, natura dell'adesivo e corrispondente applicazione, lunghezza di ancoraggio del rinforzo e tipo di preparazione del substrato). Le conclusioni tratte rappresentano un primo passo verso lo sviluppo di opportune formule di progetto da applicare nel caso dei rinforzi SRP/SRG.

RINGRAZIAMENTI

The Authors would like to thank "Kerakoll S.p.A." (Italy) for technical and financial support to the experimental program. The program has also been financially supported by ReLUIS-Italian Department of Civil Protection's Executive Project 2015.

REFERENCES

- De Santis, S., de Felice, G., Napoli, A. & Realfonzo, R. 2016. Strengthening of structures with Steel Reinforced Polymers: a state-of-the-art review. *Accepted for publication to Composites Part B: Eng.*
- Figeys, W., Schueremans, L., Brosens, K. & Van Gemert, D. 2005. Strengthening of Concrete Structures Using Steel Wire Reinforced Polymer. *FRP Reinforcement for Concrete Structures – Proc. of the 7th Int. Symp., FRPRCS'05 - ACI SP-230, 1, Paper #43, pp. 743-762.*
- Hardwire LLC - web site: www.hardwirellc.com (accessed date: June, 2016).
- Kerakoll S.p.A. - web site: www.kerakoll.com (accessed date: June, 2016).
- Matana, M., Nanni, A., Dharani, L., Silva, P. & Tunis, G. 2005. Bond Performance of Steel Reinforced Polymer and Steel Reinforced Grout. *Bond Behaviour of FRP in Structures – Proc. Intern. Symp., BBFS'05, Hong Kong, pp. 125-132.*
- Mitolidis, G.J., Salonikios, T.N. & Kappos, A.J. 2008. Mechanical and bond characteristics of SRP and CFRP reinforcement – A comparative research. *The Open Construction and Building Technology J., 2: 207-216.*
- Napoli, A. & Realfonzo, R. 2014. Sistemi SFRP e SFRG per il rinforzo di elementi in calcestruzzo: risultati di test di delaminazione. *XX Congresso CTE – Proc. Italian Congress, CTE'14, Milano, Novembre 6-8, pp. 21-30.*
- Napoli, A., de Felice, G., De Santis, S. & Realfonzo, R. 2016. Bond behaviour of Steel Reinforced Polymer strengthening systems. *Comp Struct, 152: 499-515.*
- Realfonzo, R., Napoli, A., Ascione, F. & Lamberti, M. 2016. Bond behavior of SRP/SRG systems on concrete substrate: experimental investigation. *The New Boundaries of Structural Concrete - Proc. of the Fourth Intern. Workshop, NBSC'16, Capri, 29 Sep-1 Oct, 10 pp.*