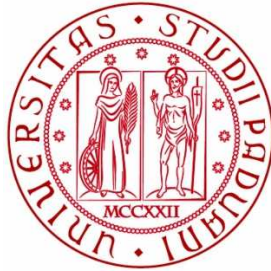


**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA EDILE**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE ED AMBIENTALE**



**TESI DI LAUREA SPECIALISTICA**

**ADERENZA TRA COMPOSITI FRCM E CALCESTRUZZO.**

**ASPETTI SPERIMENTALI**

**(BOND BEHAVIOR BETWEEN CONCRETE AND FRCM COMPOSITES.  
EXPERIMENTAL ASPECTS)**

**Relatore:** Ch.mo Prof. Carlo Pellegrino

**Correlatore:** Ing. Tommaso D'Antino

**Laureando:** Leonardo Tonietto  
626244-ID

Anno accademico 2014-2015



---

# SOMMARIO

<b>1. INTRODUZIONE</b> .....	1
<b>2. I MATERIALI COMPOSITI</b> .....	3
2.1 GENERALITA' .....	3
2.2 I MATERIALI COMPOSITI FIBRORINFORZATI .....	4
2.3 LE FIBRE .....	6
2.3.1 FIBRE DI CARBONIO .....	8
2.3.2 FIBRE DI VETRO .....	10
2.4 LE MATRICI .....	12
2.5 IL LEGANTE .....	14
2.6 SISTEMI DI RINFORZO FRCM .....	15
2.7 MECCANISMI DI CRISI DEI MATERIALI COMPOSITI .....	16
2.7.1 MECCANISMI DI CRISI DEI COMPOSITI FRCM .....	17
2.7.1.1 PROVE DI PULL-OUT SU COMPOSITI FRCM .....	17
2.8 COMPARAZIONE DEI PRINCIPALI METODI DI RINFORZO STRUTTURALE NELL'EDILIZIA ESISTENTE .....	18
<b>3. STUDI E SPERIMENTAZIONI ESISTENTI</b> .....	19
3.1 INVESTIGATION OF BOND BEHAVIOR OF PBO FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS MATRIX COMPOSITE-CONCRETE INTERFACE - <i>L. H. Sneed, T. D'Antino, C. Carloni – 2014</i> .....	19
3.2 EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE BOND BEHAVIOR OF GLASS, CARBON AND STEEL FRCM COMPOSITES. - <i>T. D'Antino, C. Pellegrino,         C. Carloni, L. H. Sneed, G. Giacomini – 2014</i> .....	39
<b>4. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI UTILIZZATI</b> .....	49
4.1 PROVA DI COMPRESSIONE SU CALCESTRUZZO .....	49

4.2 PROVA DI CARATTERIZZAZIONE SU MALTA.....	51
4.2.1 CARATTERIZZAZIONE “CONCRETE ROCK S” DELLA PRIMA CAMPAGNA DI PROVE .....	53
4.2.2 CARATTERIZZAZIONE “CONCRETE ROCK S” DELLA SECONDA CAMPAGNA DI PROVE .....	56
4.2.3 CARATTERIZZAZIONE “CONCRETE ROCK S” DELLA TERZA CAMPAGNA DI PROVE .....	56
4.3 PROVA DI TRAZIONE SULLE FIBRE .....	57
4.3.1 FIBRA DI CARBONIO C-NET 170BL.....	58
4.3.2 FIBRA DI VETRO G-NET 251BA.....	61
<b>5. SPERIMENTAZIONE .....</b>	<b>65</b>
5.1 OGGETTO DELLA SPERIMENTAZIONE.....	65
5.2 PREPARAZIONE DEI PROVINI.....	65
5.2.1 PRIMA CAMPAGNA DI PROVE – FRM + C-NET 170BL.....	66
5.2.2 SECONDA CAMPAGNA DI PROVE – FRM + G-NET 251BA.....	71
5.2.3 TERZA CAMPAGNA DI PROVE – PROVINI DI RECUPERO E STRAIN GAUGES.....	73
5.3 PROSPETTO DEI PROVINI DELLA SPERIMENTAZIONE .....	77
5.4 SET UP DELLA PROVA DI TAGLIO DIRETTO.....	78
<b>6. RISULTATI OTTENUTI ED ELABORAZIONE.....</b>	<b>81</b>
6.1 COMPOSITI FRM RINFORZATI CON C-NET 170BL .....	81
6.1.1 SERIE DS_CS17_100_60 .....	81
6.1.2 SERIE DS_CS17_200_60 .....	83
6.1.3 SERIE DS_CS17_330_60 .....	85
6.1.4 SERIE DS_CS17_450_60 .....	87
6.2 CONCLUSIONI FRM RINFORZATI CON C-NET 170BL.....	89
6.3 MISURA DELLE DEFORMAZIONI – SERIE DS_CS17_450_60_S.....	91
6.3.1 PROVINO DS_CS17_450_60_S_1.....	91
6.3.2 PROVINO DS_CS17_450_60_S_2.....	95
6.3.3 PROVINO DS_CS17_450_60_S_3.....	97
6.4 CURVE DI FITTING: FUNZIONI CONTINUE E METODO DISCRETO .....	99

---

6.5 COMPOSITI FRCM RINFORZATI CON G-NET 251BA .....	106
6.5.1 SERIE DS_GS25_100_55 .....	106
6.5.2 SERIE DS_GS25_200_55 .....	108
6.5.3 SERIE DS_GS25_330_55 .....	110
6.5.4 SERIE DS_GS25_450_55 .....	112
6.6 CONCLUSIONI FRCM RINFORZATI CON G-NET 251BA.....	114
<b>7. CONCLUSIONI</b> .....	<b>117</b>
7.1 CONSIDERAZIONI FINALI.....	117
7.2 SPERIMENTAZIONI FUTURE .....	118
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>121</b>
<b>APPENDICE</b> .....	<b>123</b>
ALLEGATO 1 .....	125
ALLEGATO 2 .....	127
ALLEGATO 3 .....	129
ALLEGATO 4 .....	131
ALLEGATO 5 .....	133



# 1. INTRODUZIONE

Il patrimonio edilizio italiano, con la sua crescente importanza in ambito internazionale, annovera costruzioni di rilevante valore storico ed architettonico, oltre che realizzazioni più recenti di muratura, di calcestruzzo armato ed acciaio. La maggior parte di queste ultime ha superato abbondantemente i trent'anni di vita, per cui molte di esse necessitano di interventi più o meno urgenti di riabilitazione strutturale, dovuti ad un degrado fisiologico delle strutture, a mutate condizioni di carico non previste in fase progettuale o ad adeguamenti nei confronti di nuove normative di sicurezza. Le soluzioni possibili sono la demolizione e ricostruzione della struttura o il rinforzo. Per questioni di economicità e convenienza, spesso si sceglie quest'ultima soluzione, accrescendo la tendenza al riuso del patrimonio edilizio esistente, con il conseguente interesse nel campo della ricerca verso soluzioni innovative adatte allo scopo.

I materiali compositi sono stati dunque, negli ultimi anni, oggetto di notevole sviluppo nel campo dell'Ingegneria Civile, offrendo elevate prestazioni e bassa invasività degli interventi, rendendoli estremamente efficaci principalmente come sistemi di rinforzo di strutture esistenti in muratura e C.A. Essi sono generalmente costituiti dall'unione di due o più materiali che, combinando le loro singole caratteristiche, permettono di ottenere un composito con i livelli prestazionali richiesti. Gli elementi costituenti sono il rinforzo, costituito da fibre ad alta resistenza, e la matrice, che ha il compito di legare il rinforzo al substrato e trasferire le sollecitazioni dall'uno all'altro.

Tra i compositi fibrorinforzati più noti ed utilizzati, figurano quelli a matrice polimerica (FRP - Fiber Reinforced Polymer), costituiti da fibre resistenti (in prevalenza di carbonio, vetro o PBO) applicate al substrato mediante una matrice organica (in genere resina epossidica). L'elevata resistenza meccanica di questo tipo di interventi, unita ad una estrema leggerezza e resistenza alla corrosione, ne ha permesso un rapido sviluppo al punto che sono attualmente disponibili diverse linee guida per la progettazione di questo tipo di rinforzo in tutto il mondo. L'uso di resine epossidiche costituisce però il limite di questi compositi, comportando scarsa resistenza al fuoco, bassa traspirabilità ed infine tossicità, con la conseguente necessità d'impiego di manodopera specializzata per la posa in opera.

Una promettente alternativa all'utilizzo dei compositi FRP è rappresentata dai cosiddetti materiali compositi a matrice cementizia (FRCM - Fiber Reinforced Cementitious Matrix), costituiti da fibre lunghe ad alta resistenza applicate al substrato per mezzo di matrici cementizie inorganiche. I compositi FRCM rappresentano una novità nel mondo del rinforzo di strutture esistenti in C.A. e la letteratura disponibile a riguardo è ancora assai limitata. I vantaggi legati all'uso di questa tecnologia sono dovuti alla facilità di messa in opera dei materiali, una buona resistenza al fuoco e la completa

compatibilità con substrati in C.A. o muratura, garantendo anche la traspirabilità e la possibilità di impiego in interventi di retrofit.

Tuttavia, data la recente introduzione di questo tipo di materiali negli interventi di restauro e rinforzo strutturale, l'utilizzo di queste nuove tecnologie si scontra inevitabilmente con la carenza di indicazioni normative. In Italia la progettazione, l'esecuzione ed il controllo degli interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati FRP, sono regolamentati dalle istruzioni CNR-DT 200/2004 e dalle relative linee guida approvate nel luglio 2009.

E' totalmente assente, invece, qualsiasi tipo di indicazione normativa riguardante i compositi FRCM, ancora ampiamente in fase di studio. E' compito dei ricercatori, quindi, fornire tutti gli strumenti necessari affinché si arrivi alla comprensione dei meccanismi che regolano il funzionamento di questa nuova tecnologia, per poter mettere gli operatori nella condizione di poter progettare interventi sul patrimonio edilizio esistente.

Questo risultato può essere raggiunto solamente continuando le molte sperimentazioni in corso nel mondo, ed è in tal senso che si prefigura lo studio descritto in questo documento, proponendosi come ampliamento della banca dati delle sperimentazioni esistenti, a supporto delle sperimentazioni future.

Nelle pagine seguenti viene descritta una campagna sperimentale condotta su diversi tipi di composito FRCM rinforzato con fibra di carbonio e fibra di vetro, applicato su un substrato di calcestruzzo con varie lunghezze di incollaggio. E' stato utilizzato il metodo di prova di taglio diretto singolo per studiare il meccanismo di trasferimento di tensione tra il composito ed il substrato, elemento fondamentale per l'efficacia degli interventi di rinforzo con tali compositi.



## 2. I MATERIALI COMPOSITI

### 2.1 GENERALITA'

Per definizione, i materiali compositi sono costituiti da due o più materiali, detti fasi, di natura diversa e macroscopicamente distinguibili, ed almeno due delle fasi presentano caratteristiche fisiche e meccaniche sufficientemente diverse tra loro in modo da impartire al composito proprietà differenti da quelle dei costituenti. A seconda della loro funzione, le fasi prendono il nome di *matrice* (solitamente un continuo isotropo e omogeneo) e *rinforzo* (solitamente anisotropo) (Fig. 2.1). L'insieme di queste due parti costituisce un materiale in grado di garantire proprietà meccaniche elevatissime e massa volumica decisamente bassa: per questo motivo i compositi sono largamente usati nelle applicazioni dove la leggerezza è cruciale.

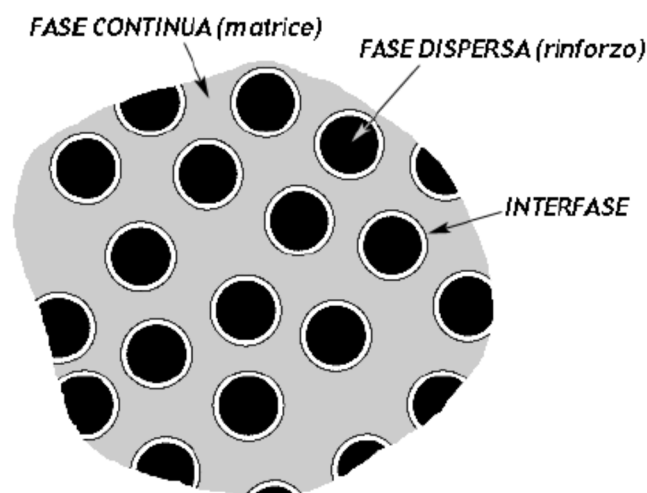


Fig. 2.1 – Schema delle fasi costituenti un composito. [1]

Il *rinforzo* è rappresentato da una fase dispersa che viene inserita in varie modalità all'interno della matrice e ha il compito di assicurare rigidità e resistenza meccanica, assumendo su di sé la maggior parte del carico esterno.

A seconda del tipo di rinforzo, i materiali compositi si suddividono in:

- compositi particellari;
- compositi rinforzati con fibre;
- compositi strutturati (ad esempio pannelli a sandwich e materiali compositi laminati).

La *matrice* ha il compito di amalgamare e mantenere l'unione della fase dispersa (rinforzo). Generalmente contribuisce solo parzialmente alle caratteristiche meccaniche finali; è invece fondamentale, data la sua bassa densità, per garantire la leggerezza del materiale composito.

A seconda della natura della matrice, si individuano diverse categorie di materiali compositi, tra cui:

- compositi a matrice polimerica (termoplastici come il Nylon e l'ABS o termoindurenti come le resine epossidiche);
- compositi a matrice metallica (generalmente alluminio, o titanio e loro leghe);
- compositi a matrice ceramica (generalmente carburo di silicio o allumina);
- compositi carbonio-carbonio: sia la matrice che il rinforzo sono costituiti da carbonio;
- compositi ibridi: contengono due o più tipologie di fibre.

## 2.2 I MATERIALI COMPOSITI FIBRORINFORZATI

Con il termine *Fiber Reinforced Polymers* (o *FRP* o materiali fibrorinforzati a matrice polimerica) si indica una vasta gamma di materiali compositi, costituiti da una matrice polimerica di natura organica con la quale viene impregnato un rinforzo in fibra continua con elevate proprietà meccaniche.

La natura delle fasi che costituiscono il composito contribuisce in maniera determinante alla formazione delle proprietà finali del materiale. Tuttavia, per ottenere un composito ad elevata resistenza meccanica, non è sufficiente utilizzare fibre "resistenti": è anche indispensabile garantire una buona adesione tra la matrice ed il rinforzo.

L'adesione viene di solito promossa mediante l'impiego di un terzo componente, che, applicato in strato molto sottile sulla superficie delle fibre, la rende compatibile con la matrice organica. Tale trattamento superficiale del rinforzo comporta la presenza di una terza fase intermedia tra la matrice e le fibre, detta *interfaccia* o *interfase* (Fig. 2.1). L'interfaccia consiste normalmente in uno strato molto sottile (spesso monoatomico), localizzato alla superficie del rinforzo, le cui caratteristiche, pur non contribuendo direttamente alle proprietà meccaniche globali del composito, sono tuttavia fondamentali per il successo del sistema complessivo nelle applicazioni strutturali [1].

I principali vantaggi che questo materiale offre sono:

- elevata leggerezza (ne deriva un incremento pressoché nullo delle masse sismiche ed allo stesso tempo un considerevole aumento della duttilità strutturale);
- elevata resistenza meccanica;

- elevate resistenza alla corrosione;
- buon comportamento a fatica;
- messa in opera senza l'ausilio di particolari attrezzature da un numero limitato di operatori ed in un'elevata varietà di forme;
- posizionamento in tempi brevi e spesso senza interrompere l'esercizio della struttura.

Tuttavia, i molti svantaggi, come la bassa resistenza al calore e al fuoco della matrice (legata alla bassa temperatura di transizione vetrosa), la difficoltà di applicazione a basse temperature, l'impossibilità di applicazione su superfici umide e la mancanza di permeabilità al vapore, hanno reso necessario lo sviluppo di un sistema innovativo noto come *FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix)*. In questo nuovo sistema la matrice organica viene sostituita da una matrice inorganica.

E' conveniente, ai fini dell'esame delle loro proprietà, distinguere i compositi fibrorinforzati in due categorie principali, indipendentemente dalla tecnologia di produzione [1]:

- *monostrato* (lamina) – sono in generale dei materiali anisotropi e conseguentemente la descrizione delle loro proprietà meccaniche dipende dalla scelta del sistema di riferimento. Di solito gli assi del riferimento vengono fatti coincidere con quelli di simmetria del materiale;
- *multistrato* (laminati) – sono materiali costituiti da strati di qualche decimo di millimetro di spessore sovrapposti fra loro. Nel caso più semplice, le fibre sono contenute esclusivamente nel piano della lamina (non sono presenti fibre disposte perpendicolarmente a tale piano). Le dimensioni dei laminati sono intermedie fra quelle delle fibre di rinforzo e quelle delle strutture di interesse ingegneristico. Il principale vantaggio dei laminati è rappresentato dalla massima libertà nella disposizione delle fibre, pur essendo ovviamente richiesto un controllo sistematico sulle scelte operate e quindi sulle proprietà del materiale composito.

Anche se il dettaglio dei meccanismi chimico-fisici che determinano l'adesione tra fibra e matrice è delegato al produttore del materiale, non va dimenticato che la mancanza di adesione tra fibre e matrice è una delle cause principali di cedimento strutturale dei materiali compositi [1].

## 2.3 LE FIBRE

La fase fibrosa è costituita da fibre molto sottili di varia lunghezza alle quali sono dovute le principali caratteristiche meccaniche del materiale composito finale. Il materiale delle fibre è solitamente rigido, caratterizzato da alte resistenze ma con un comportamento prevalentemente fragile. La normativa ASTM D3868, stabilisce che possa essere chiamato filamento qualunque materiale di forma allungata che abbia il rapporto tra la minima lunghezza e la massima dimensione trasversale di 10:1 e con una massima dimensione trasversale inferiore al millimetro. La denominazione di fibra viene invece associata a uno o più filamenti riuniti in modo ordinato.

Essendo costituite da filamenti continui molto sottili e quindi difficili da manipolare singolarmente, le fibre sono disponibili commercialmente in varie forme, di cui le più comuni sono descritte in seguito e riportate in Fig. 2.2 [1]:

- *filamento (monofilament)*: elemento base con dimensioni di circa 10  $\mu\text{m}$  di diametro;
- *cavo di filatura (tow)*: è il prodotto della macchina di filatura ed è costituito da un fascio formato da un gran numero di filamenti (dell'ordine delle migliaia), praticamente senza torsione, destinato ad essere filato, ritorto o strappato per l'utilizzazione sotto forma di fibra discontinua;
- *filo o filato (spun yarn)*: filo formato da fibre tenute insieme da torsione;
- *filo assemblato (roving)*: fascio costituito da filati assemblati parallelamente e senza torsione intenzionale.

Combinando insieme alcune centinaia di tows o yarns si ottiene il tape, in cui i tows o gli yarns possono essere semplicemente affiancati oppure cuciti tra loro o fissati su un supporto.

Oltre che in forma di yarn o di roving, le fibre sono anche disponibili commercialmente in composizioni opportunamente arrangiate in modo da formare una grande varietà di tessuti (fabric). In tal caso la disposizione delle fibre può essere tale da conferire ai corrispondenti compositi delle caratteristiche di quasi isotropia nel piano. Nei tessuti si distingue una direzione principale, detta ordito (warp), ed una trasversale ortogonale alla prima, detta trama (weft).

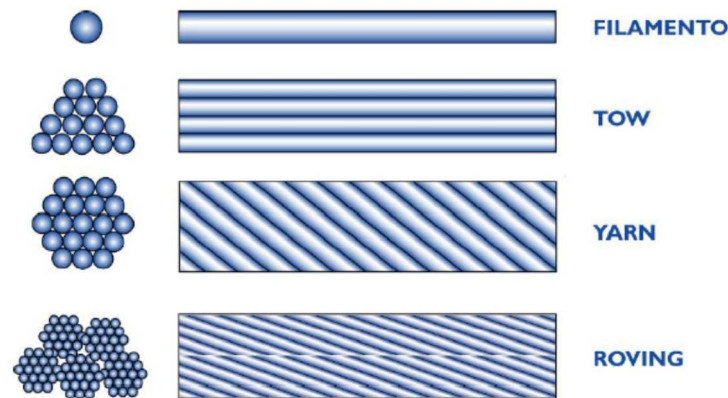


Fig. 2.2 – Tipologie di fibre. [1]

La particolare geometria filiforme, oltre a risultare molto indicata per la realizzazione dei compositi, conferisce a tali materiali caratteristiche di rigidità e di resistenza molto più elevate di quelle possedute dagli stessi materiali quando siano utilizzati in configurazione tridimensionale.

Le fibre possono essere utilizzate in diversi formati: fibre lunghe, fibre corte e tessuti [9]:

- *Fibre lunghe (o continue)*: generalmente le fibre sono lunghe come l'elemento intero o parte di esso e sono disposte parallelamente fra loro lungo una direzione definita. Hanno il vantaggio di garantire la trasmissione della sollecitazione dal punto di applicazione del carico al vincolo.
- *Fibre corte*: in questo caso la lunghezza delle fibre varia da qualche millimetro a pochi centimetri e la loro disposizione nell'elemento è casuale.
- *Tessuti*: in questo caso le fibre vengono tessute secondo una vasta gamma di possibilità anche in forma tridimensionale o utilizzando fibre di tipo diverso. L'orientamento delle fibre in una, due o tre direzioni permette di adattarsi alle più svariate esigenze di progetto.
- *Tessuti UNIDIREZIONALI*: le fibre sono orientate tutte nella stessa direzione e tenute assieme da una trama leggera di tipo strutturale. Essi presentano un'elevata resistenza a trazione secondo la direzione delle fibre stesse e sono anisotropi anche nel piano;
- *Tessuti BIDIREZIONALI*: le fibre sono orientate in due direzioni preferenziali a formare una tessitura trama-ordito ortogonale di solito bilanciata. In questo caso i filamenti della trama e dell'ordito non sono completamente distesi, ma nel

sovrapporsi alternativamente, si incurvano aumentando la deformabilità finale del tessuto;

- *Tessuti MULTIASSIALI*: le fibre sono orientate in diverse direzioni del piano senza una direzione preferenziale. Essi sono finalizzati all'ottenimento di una maggiore resistenza allo strappo ed agli sforzi di taglio.

Le fibre hanno una elevata resistenza a trazione e rappresentano pertanto gli elementi resistenti del materiale fibrorinforzato. Infatti, quando un materiale fibrorinforzato subisce uno sforzo assiale di trazione, gli sforzi veri e propri vengono assorbiti dalle fibre, mentre alla matrice si demanda il solo compito di distribuzione degli stessi fra le fibre, determinando così una uniformità di sollecitazione tra queste.

Sebbene la resistenza a trazione risulti essere ben al di sopra dei tassi di lavoro cui sono soggette le fibre, il parametro principale che definisce le caratteristiche di un rinforzo fibroso è il modulo elastico; infatti più tale valore è elevato, maggiore sarà il contributo irrigidente che il rinforzo potrà fornire all'elemento strutturale sul quale è applicato.

Le fibre più usate per la produzione di materiali compositi sono quelle di vetro, di carbonio e le fibre aramidiche.

Di seguito un breve approfondimento sui materiali usati nella sperimentazione descritta in questo documento.

### 2.3.1 FIBRE DI CARBONIO [1]

Il termine "fibre di carbonio" indica fibre con un contenuto di carbonio variabile tra l'80 ed il 95%. Sono fibre usate per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni e si distinguono per il loro alto modulo di elasticità normale e per la loro elevata resistenza. Esse esibiscono un comportamento a rottura intrinsecamente fragile caratterizzato da un assorbimento di energia relativamente modesto, anche se le tensioni di rottura sono elevate. Inoltre risultano essere poco sensibili ai fenomeni di scorrimento viscoso (creep) e di fatica e sono contraddistinte da una modesta riduzione della resistenza a lungo termine.

Il numero di filamenti contenuti nel cavo di filatura (tow) può variare da 400 a 160000.

Sul mercato sono presenti diversi tipi di fibre di carbonio caratterizzate da parametri di elasticità e resistenza molto diversi tra loro. La resistenza specifica delle fibre di carbonio (circa 40

volte superiore al comune acciaio d'armatura FeB44K) è il parametro che maggiormente caratterizza le scelte di mercato (Tab. 2.1).

Le tipologie di fibre più diffuse vengono denominate come carbonio ad alta tenacità (HT), ad alto modulo (HM) e ad altissimo modulo (UHM). Nelle applicazioni edilizie si prediligono le fibre standard o ad alta tenacità; le fibre ad alto e altissimo modulo, invece, vengono utilizzate solo in casi particolari.



Fig. 2.3 - Esempio di tessuto bidirezionale in fibra di carbonio. [9]

Gli FRP a base di fibre di carbonio si denotano usualmente con l'acronimo CFRP (C=carbon).

Materiale	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	Modulo Elastico [GPa]	Resistenza a Trazione [MPa]	Deformazione a Rottura [%]	Resistenza Specifica [Mpa * m <sup>3</sup> /kg]
Carbonio ad alta resistenza	1800	230	5000	2	2,78
Carbonio ad alto modulo (HM)	1850	400	3000	0,9	1,62
Carbonio ad altissimo modulo	2100	700	1500	0,3	0,71
Acciaio FeB44K	7850	210	540	20	0,07

Tab. 2.1 - Confronto tra le fibre di carbonio più comuni e l'acciaio da costruzione. [12]

### 2.3.2 FIBRE DI VETRO [1]

Il vetro è composto principalmente da silice ( $\text{SiO}_2$ ) in struttura tetraedrica ( $\text{SiO}_4$ ) alla quale sono aggiunti, in varie proporzioni, ossidi di alluminio ed altri ioni metallici per facilitare le operazioni di lavorazione o per modificare alcune proprietà.

Le fibre di vetro si caratterizzano per la loro elevata resistenza, mentre la designazione tecnica viene effettuata secondo le norme ISO 1139/1973 e ISO 2078/1993 e consta dei seguenti elementi:

- la prima lettera identifica il tipo di vetro utilizzato;
- la seconda lettera indica il tipo di fibra utilizzato:
  - C (iniziale di “Continuo”, per i filamenti);
  - D (iniziale di “Discontinuo”, per le fibre discontinue);
- un numero che indica il diametro nominale (in  $\mu\text{m}$ ) del filamento;
- un numero, separato da uno spazio, che indica la massa lineare della fibra in Tex;
- il senso e il valore di torsione ( $S$  = negativa,  $Z$  = positiva), espresso in giri/m (opzionale);
- il numero di fili costituenti i ritorti (opzionale);
- un codice del produttore contenente tutte quelle informazioni, non codificate, ritenute indispensabili per caratterizzare il prodotto (opzionale).

Nelle sue linee essenziali, la tecnologia di produzione delle fibre di vetro è basata sulla filatura di una miscela (*batch*) costituita principalmente da sabbia, allumina e calcare. I filamenti, prodotti per filatura da fuso, sono quindi raggruppati con l'imposizione eventuale di una leggera torsione, a formare una treccia o fibra (*strand* o *end*), tipicamente costituita da 204 filamenti.

I singoli filamenti presentano un diametro medio dell'ordine dei  $10 \mu\text{m}$  e sono ricoperti da un legante o bozzima (*binder* o *size*). I filati sono raccolti, perlopiù senza ritorcitura, in *roving*. I valori della massa lineare tipici del *roving* per applicazioni nel settore civile sono superiori a 2000 Tex (g per kg di fibra).

Le fibre di vetro sono anche disponibili in forma di fogli sottili, denominati *mat*. Un *mat* può essere costituito sia da fibre lunghe continue che da fibre corte (cioè fibre discontinue di lunghezza tipica compresa tra 25 e 50 mm) disposte casualmente nel piano (Fig. 2.4) e tenute assieme da un legante chimico. La larghezza dei *mat* è variabile tra 5 cm e 2 m; la loro densità di massa è dell'ordine di  $0.5 \text{ kg/m}$ .





Fig. 2.4 – Yarn (a sinistra) e Mat (a destra) in fibra di vetro. [13]

Al variare delle proporzioni delle materie prime impiegate si ottengono prodotti con caratteristiche e prestazioni meccaniche diverse tra loro. I tipi più diffusi sono quello “E” ed “S”; il tipo E è meno pregiato e più economico ed ha caratteristiche meccaniche modeste rispetto al tipo S che raggiunge resistenze paragonabili a quelle delle fibre di carbonio, ma con un modulo elastico sensibilmente più basso e con un costo molto elevato.

Materiale	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	Modulo Elastico [GPa]	Resistenza a Trazione [MPa]	Deformazione a Rottura [%]	Resistenza specifica [Mpa * m <sup>3</sup> /kg]
Fibre di vetro tipo E	2550	70	3500	3,8	1,37
Fibre di vetro tipo S	2500	90	4700	5,5	1,88
Acciaio FeB44K	7850	210	540	20	0,07

Tab. 2.2 – Confronto fra le fibre di vetro più diffuse e l'acciaio d'armatura. [12]

Le fibre di vetro hanno il vantaggio di avere un basso costo, per questo vengono spesso utilizzate in combinazione con altre fibre per ottenere un rinforzo di proprietà intermedie e costi contenuti. Esse esibiscono un modulo di elasticità normale inferiore a quello delle fibre di carbonio o a quello delle fibre aramidiche ed offrono una resistenza all'abrasione relativamente modesta, che richiede una certa cautela nelle operazioni di manipolazione prima dell'impregnazione. Inoltre, presentano una pronunciata attitudine allo scorrimento viscoso ed una modesta resistenza a fatica.

Si ricorda inoltre l'ottima compatibilità con le matrici organiche e lo svantaggio di essere facilmente attaccate dagli alcali che le porta ad essere, per la maggior parte, incompatibili con matrici cementizie. Per promuovere l'adesione tra fibre e matrice e per proteggere le fibre dall'azione degli agenti alcalini e dall'umidità, le fibre sono sottoposte a trattamenti di ensimaggio (sizing) con sostanze aventi funzione di compatibilizzante. Tali trattamenti sono molto utili ai fini della durabilità e della resistenza a fatica (statica e dinamica) del materiale composito.

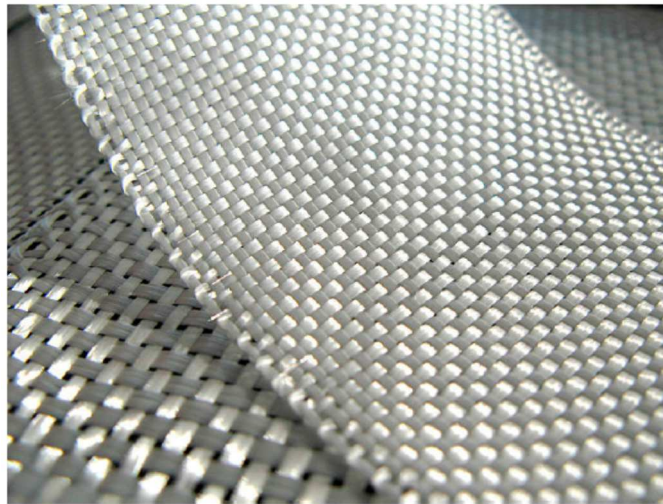


Fig. 2.5 – Esempio di tessuto bidirezionale in fibra di vetro. [9]

Gli FRP a base di fibre di vetro si denotano usualmente con l'acronimo GFRP (G=glass).

## 2.4 LE MATRICI [9]

Nella realizzazione del rinforzo in fibra, la fase continua detta matrice, riveste quattro compiti fondamentali.

Essa infatti è:

- il legante che assicura il mantenimento della forma del rinforzo;
- il collante che preserva la corretta adesione tra elemento rinforzato e rinforzo;
- l'elemento di protezione delle fibre da attacchi fisico-meccanici;
- l'elemento che trasferisce le forze dal substrato rinforzato al rinforzo e le ripartisce tra le fibre.

Le matrici devono assicurare inoltre un'adesione sufficiente (con eventuale interposizione di legante) e, contemporaneamente, resistere agli sforzi di taglio presenti all'interfaccia fibra-matrice in modo da essere in grado di trasmettere le sollecitazioni tra le fibre e, se necessario, anche tra gli spezzoni di fibre eventualmente danneggiate.

Le caratteristiche meccaniche della matrice sono, in generale, decisamente inferiori a quelle delle fibre, ma la loro unione realizza un perfetto connubio di resistenza e durabilità nel tempo, oltre a garantire la funzione per la quale il rinforzo è stato concepito.

Vista la natura polimerica della quasi totalità delle matrici utilizzate per la realizzazione dei materiali compositi per le applicazioni civili, alla fase matrice ci si riferisce generalmente con il termine resina. Le resine possono avere caratteristiche termoindurenti o termoplastiche.

La principale caratteristica che distingue le resine termoindurenti (le più diffuse nel settore civile sono le epossidiche) da quelle termoplastiche è che le prime, una volta indurite mediante reticolazione, non possono ritornare nelle condizioni iniziali e, se portate a temperature elevate, degradano e si decompongono; le seconde invece possono essere riscaldate (almeno in via teorica) e modellate a caldo e raffreddate, reiterando il procedimento numerose volte.

In questi ultimi anni stanno progressivamente diffondendosi nel rinforzo delle strutture civili, materiali compositi a matrice cementizia. Quando il materiale composito fibroso, come in questo caso, è annegato in una matrice inorganica cementizia, si parla di un rinforzo strutturale *FRCM* (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*). Questa tecnologia nasce per ovviare a quei problemi e a quelle limitazioni che si riscontrano nelle fasi di applicazione e di posa in opera dei rinforzi a matrice polimerica [1].

La matrice cementizia è costituita da una malta speciale ottenuta con cementi di tipo pozzolanico additivati con fibre o polimeri, da miscelarsi con la sola aggiunta di acqua.

I vantaggi che presentano si possono così riassumere [13]:

- assenza di manodopera specializzata per la posa in opera, essendo prive di sostanze tossiche;
- resistenza al fuoco e buona resistenza ai raggi UV, eliminando il decadimento prestazionale dovuto alle alte temperature, tipico delle matrici polimeriche;
- permeabilità comparabile a quella del supporto: il sistema di rinforzo FRCM permette il normale scambio termigrometrico della struttura rinforzata con l'esterno;
- applicabilità su supporti umidi: l'umidità presente nelle strutture infatti non inficia il normale indurimento della malta cementizia, anzi, come per il calcestruzzo, ne migliora l'adesione;

- applicabilità su supporti scabri e irregolari: la malta cementizia è in grado di riempire eventuali irregolarità che possono essere presenti sulla superficie del supporto.

Una caratteristica negativa risiede invece nelle condizioni ambientali della messa in opera, che dovrebbe avvenire in un intervallo di temperatura compresa fra 5°C e 35°C in quanto a temperature più alte si riduce notevolmente la lavorabilità della malta, mentre a temperature più basse si rallenta la presa. Questa criticità è comunque presente anche nelle resine organiche che hanno, in linea di massima, lo stesso intervallo di temperatura ottimale per la preparazione e la messa in opera.

Inoltre, l'utilizzo di una matrice inorganica riduce significativamente l'impregnazione delle singole fibre nei fasci e di conseguenza riduce la forza di incollaggio. Una malta cementizia polimero-modificata risulta dare un miglior legame fra la matrice e le fibre ed una migliore resistenza e durezza; essa è quindi la malta inorganica più promettente per il sistema FRCM.

Nella Tab. 2.3 vengono sintetizzate le principali differenze fisico-meccaniche fra le matrici cementizie e le resine epossidiche.

Matrice	Modulo Elastico [GPa]	Resistenza a Trazione (per flessione) [MPa]	Resistenza alle alte temperature	Tossicità	Pulizia attrezzi usati per la posa	Comportamento a rottura	Viscosità
Cementizia	6	3,5 (a 28 gg)	Identica a quella del supporto in calcestruzzo	Nulla	Con sola acqua	Duttile	Alta allo stato fluido e quindi difficile impregnazione delle fibre
Resina Epossidica	2,7 - 3,6	40 - 82	Perdono le loro caratteristiche strutturali e di adesione già ad 80°C	Pericolosità sia per contatto che per inalazione	Con solventi nitro ed acetone	Fragile	Bassa allo stato fluido e quindi facile impregnazione delle fibre

Tab. 2.3 – Caratteristiche principali delle matrici cementizie e delle resine epossidiche. [12]

## 2.5 IL LEGANTE

Il legante, che può essere presente o meno, permette l'aderenza, e di conseguenza la trasmissione delle sollecitazioni, nell'interfaccia fibra-matrice.

Generalmente un legame di interfaccia forte rende il materiale composito più rigido, ma di conseguenza più fragile, mentre un legame più debole incrementa la tenacità del composito riducendone inevitabilmente la resistenza.

## 2.6 SISTEMI DI RINFORZO FRCM

Nei materiali compositi fibrorinforzati, le fasi che li costituiscono hanno delle ben determinate funzioni: le fibre svolgono il ruolo di elementi portanti sia in termini di resistenza che di rigidità, mentre la matrice, oltre a proteggere le fibre, funge da elemento di trasferimento degli sforzi tra le fibre ed eventualmente tra queste ultime e l'elemento strutturale a cui il composito è stato applicato. Di seguito vengono descritti i quattro diversi approcci maggiormente utilizzati per l'applicazione di sistemi di rinforzo FRCM in edilizia [9]:

- *Textile Reinforced Concrete (TRC)*: questa tecnica prevede l'utilizzo di un tessuto come materiale di rinforzo e di una malta cementizia a grana fine e ad alta resistenza come matrice. È un tipo di rinforzo che si può usare sia a flessione che a taglio.
- *Fibre Reinforced Cement (FRC)*: è un sistema di rinforzo costituito da un foglio di fibre o tessuto impregnato in una matrice a base cementizia. La combinazione di questi due materiali si traduce in un sottile foglio di materiale composito caratterizzato da prestazioni molto elevate e ottima durabilità e duttilità durante le prove a flessione. L'applicazione di questo tipo di rinforzo si differenzia dagli altri, infatti in questo caso il foglio o tessuto viene tagliato a misura e immerso nella matrice. Una volta impregnato viene poi applicato direttamente alla superficie di calcestruzzo. Con il rinforzo FRC si possono effettuare sia rinforzi a confinamento che a flessione.
- *Textile Reinforced Mortar (TRM)*: questo sistema di rinforzo è simile al sistema TRC. I tessuti utilizzati sono in fibra di carbonio e il legante è una malta modificata con polimeri.
- *Mineral Based Composites (MBC)*: questo sistema contiene tre componenti: il legante cementizio, la rete e il primer. Il metodo prevede la preparazione della superficie di calcestruzzo al fine di migliorare l'adesione fra i materiali e l'applicazione del primer per impedire il trasporto di umidità dalla malta al substrato. Il primo strato di malta viene applicato direttamente sulla superficie di calcestruzzo impregnata, successivamente viene posata la rete seguita da un ulteriore strato di malta. Con il rinforzo MBC si possono effettuare sia rinforzi a taglio che a flessione.

## 2.7 MECCANISMI DI CRISI DEI MATERIALI COMPOSITI [12]

Il comportamento meccanico dei materiali compositi è molto complesso, a causa della disomogeneità e dell'anisotropia del materiale. Anche i meccanismi di crisi sono molto più complessi rispetto a quelli dei materiali omogenei ed isotropi e questo rende difficile sia la previsione delle tensioni ultime, sia l'interpretazione dei risultati sperimentali.

Già all'inizio della vita del composito sono normalmente presenti interruzioni di alcune fibre. Nel corso poi della vita del componente, altre fibre si possono rompere a causa di tensioni localizzate. Generalmente è presente anche una mancanza di allineamento delle fibre, causata da una scarsa accuratezza nella lavorazione o da stati tensionali anomali.

Una volta sottoposte a carico, le fibre tendono a riallinearsi inducendo nella matrice stati di compressione e di trazione che possono provocare il distacco tra fibra e matrice, con conseguente riduzione della resistenza del composito (Fig. 2.6).

Le fibre possono essere inoltre distribuite in modo non uniforme provocando, quando il composito viene sollecitato, l'insorgere di tensioni tangenziali tra fibre e matrice. Questa sollecitazione è nota come taglio intralaminare (Fig. 2.6).

Nel caso di matrici a base polimerica può essere presente porosità dovuta sia alle bolle d'aria rimaste nel corso dell'impregnazione, sia ai gas che si sviluppano durante la polimerizzazione della resina. Possono formarsi anche fratture indotte sia dal ritiro che si verifica nel corso della polimerizzazione, sia da tensioni di origine termica. Nel caso di matrici cementizie, invece, è l'operazione stessa dell'impregnazione delle fibre ad essere difficoltosa, a causa dell'alta viscosità della malta infatti, si riesce con difficoltà ad avvolgere le fibre meno superficiali.

In ogni caso e con ogni tipo di materiale utilizzato, sia un'impregnazione non accurata che l'impiego di prodotti non compatibili, possono causare scarsa adesione tra il rinforzo e la matrice.

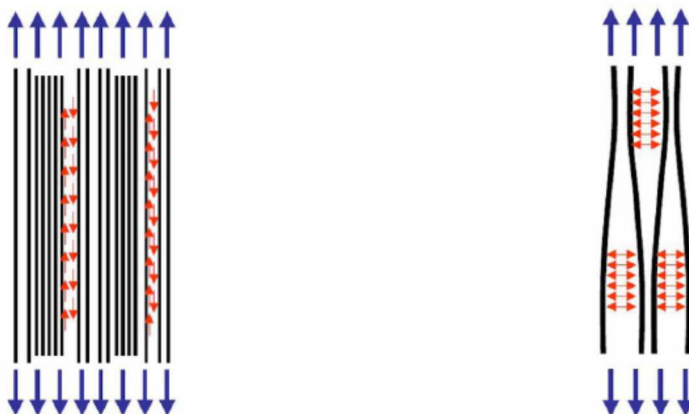


Fig. 2.6

A sinistra, distribuzione non uniforme delle fibre e conseguente nascita del taglio intralaminare sotto l'azione del carico. A destra, mancanza di allineamento delle fibre e conseguente compressione della matrice sotto l'azione del carico. [12]

## 2.7.1 MECCANISMI DI CRISI DEI COMPOSITI FRCM [12]

I meccanismi di crisi dei materiali compositi a matrice inorganica (cementizia) si differenziano sostanzialmente da quelli a matrice organica (es. resina epossidica) per le modalità con cui si manifestano.

Generalmente la rottura di provini rinforzati con questi compositi risulta più duttile di quella dei medesimi provini rinforzati con FRP, raggiungendo carichi ultimi inferiori. Il motivo di questa maggiore duttilità è comprensibile analizzando un composito unidirezionale sollecitato a trazione parallela alle fibre.

### 2.7.1.1 PROVE DI PULL-OUT SU COMPOSITI FRCM

Per testare il comportamento di un composito unidirezionale sollecitato a trazione parallela alle fibre ed individuare il meccanismo che porta ad una rottura meno repentina e quindi più duttile, si può fare riferimento ad una prova di pull-out (prova sperimentale a carattere semi-distruttivo che consiste nell'estrarre un inserto da una matrice solida per valutarne l'interazione e la resistenza dei materiali testati) che valuti l'interazione tra fibre e matrice cementizia.

Il comportamento durante la prova è condizionato dalla forte adesione che i filamenti più esterni dei fasci di fibre sviluppano con la matrice, mentre quelli più interni si lasciano scivolare come avvolti da una guaina. Questo avviene perché la penetrazione della malta tra i filati non avviene in maniera omogenea.

Infatti, a differenza delle resine epossidiche che compongono i classici FRP, le malte utilizzate nei rinforzi a matrice cementizia hanno nel loro impasto la polvere di cemento che, per quanto possa essere fine difficilmente riesce a penetrare negli spazi tra i filamenti di fibra.

Il meccanismo di rottura che si evidenzia prende il nome di “telescopic failure” (Fig. 2.7); questo nome, che letteralmente significa “rottura telescopica”, deriva proprio dalla modalità con cui si manifesta il successivo sfilamento dei filamenti (pull-out failure) che si protrae dagli strati più esterni fino al nucleo del filato e si combina ad un secondo meccanismo di crisi che coinvolge i filamenti più esterni, i quali, prima di subire l'estrazione dalla matrice cementizia, giungono a rottura per il superamento della resistenza a trazione ultima (tensile failure). In questo modo la perdita di efficacia del rinforzo diminuisce gradualmente garantendo una maggiore dissipazione di energia di rottura (e quindi la duttilità che li contraddistingue).

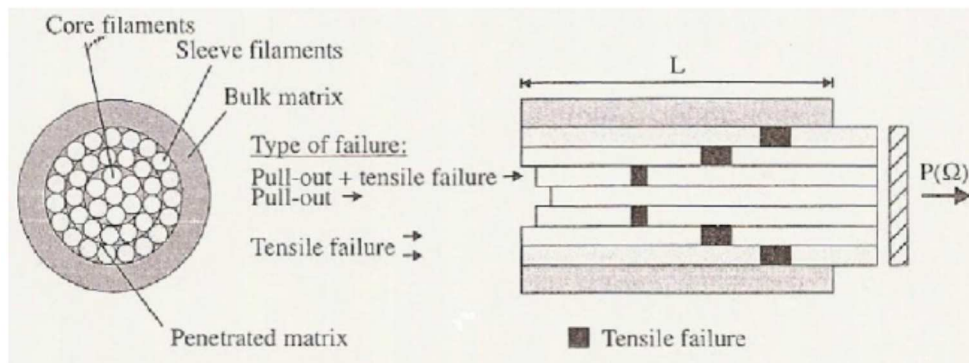


Fig. 2.7 – Meccanismi di crisi di un rinforzo in una matrice cementizia. [12]

## 2.8 COMPARAZIONE DEI PRINCIPALI METODI DI RINFORZO STRUTTURALE NELL'EDILIZIA ESISTENTE

Nella Tab. 2.4 viene proposta una comparazione dei principali vantaggi che si possono avere con l'applicazione di un particolare materiale in un intervento di recupero su un edificio. La comparazione è fatta considerando tutte le caratteristiche in positivo e con una scala di valori del tipo alto-medio-basso in modo da poter effettuare un confronto più immediato.

Caratteristica	FRP	FRCM	Acciaio	CIs
Progettabilità del rinforzo	alta	alta	bassa	bassa
Non invasività	alta	alta	media	bassa
Possibilità di spessori ridotti	alta	alta	media	bassa
Applicazioni senza incrementi di carico	alta	alta	bassa	bassa
Non alterazione dell'aspetto	alta	alta	media	media
Applicabilità in geometrie complesse	alta *	alta	bassa	alta
Leggerezza	alta	alta	bassa	bassa
Compatibilità con il supporto	media	alta	alta	bassa
Applicazione a secco	alta	media	alta	bassa
Traspirabilità e permeabilità	nulla	media	alta	media
Resistenza meccanica	alta	alta	media	media
Rapporto resistenza/densità	alta	alta	media	bassa
Resistenza al fuoco	bassa	alta	bassa	alta
Rapidità di esecuzione	alta	alta	media	bassa
Organizzazione del cantiere semplificata	alta	alta	media	bassa
Economicità dell'intervento	bassa	bassa	media	alta
Impiego di manodopera non specializzata	nulla	media	media	alta
Tolleranza dei difetti di applicazione	bassa	media	media	alta
Non tossicità degli elementi	bassa	alta	alta	alta
Poca richiesta di manutenzione	alta	alta	bassa	alta
Resistenza agli attacchi chimici	media **	media	bassa	bassa
Durabilità degli interventi	***	***	media	media
Reversibilità	alta	bassa	media	bassa

\* non vale per i compositi preformati; \*\* dipende fortemente dal tipo di matrice e di fibra; \*\*\*negativa in considerazione della carenza di dati

Tab. 2.4 – Confronto tra le caratteristiche dei diversi tipi di intervento. [13]



### 3. STUDI E SPERIMENTAZIONI ESISTENTI

In questo capitolo vengono presentate alcune pubblicazioni ritenute di particolare interesse per gli argomenti trattati, ritenute valide come termine di paragone per i risultati ottenuti nella sperimentazione descritta nel capitolo eseguito. Di seguito, la traduzione ad opera dell'autore, di due articoli in lingua originale inglese.

#### 3.1 Investigation of bond behavior of PBO Fiber Reinforced Cementitious Matrix composite-concrete interface. [6]

*L. H. Sneed, T. D'Antino, C. Carloni – 2014*

#### INTRODUZIONE

I sistemi di compositi fibro-rinforzati vengono sempre più impiegati nell'ingegneria civile per il rinforzo e l'adeguamento di strutture in calcestruzzo armato (RC). I materiali compositi rappresentano un'alternativa sostenibile alla nuova costruzione, perché consentono un allungamento della vita delle opere esistenti, prevenendone allo stesso tempo la demolizione. In genere i sistemi di compositi fibro-rinforzati sono di facile applicazione, hanno un alto rapporto resistenza-peso, richiedono un tempo relativamente ridotto per la maturazione, ed hanno proprietà meccaniche che possono essere progettate per raggiungere una data risposta strutturale.

I compositi fibro-rinforzati a base polimerica (FRP) sono i più usati attualmente per il rinforzo strutturale e l'adeguamento. L'FRP è composto da fibre continue (in genere carbonio, vetro o aramide) ed una resina termoindurente (organica), tipicamente epossidica, usata come matrice. Ingegneria civile ed architettura conoscono bene gli impieghi dei materiali FRP, e sono ben disposti a sperimentare materiali innovativi che potrebbero portare ad alternative più sostenibili rispetto ai compositi tradizionali, senza compromettere i vantaggi ed il carattere resiliente di sistemi di retrofitting. I tipi di matrice di nuova concezione che potenzialmente rappresentano una valida, sostenibile e durabile alternativa all'epossidico, sono le cosiddette matrici inorganiche. All'interno dell'ampia categoria di matrici inorganiche, le malte cementizie modificate con polimeri hanno suscitato il maggiore interesse in questi anni. La malta cementizia ordinaria viene modificata aggiungendo polveri di silice e polimeri, che migliorano la resistenza, le caratteristiche di aderenza,

la durabilità e la deformazione ultima della matrice. I composti che adottano come matrice questi tipi di malte cementizie modificate, vengono chiamati composti fibro-rinforzati a matrice cementizia (FRCM). Le fibre più comunemente usate includono carbonio, vetro, acciaio e PBO. Le fibre vengono generalmente prodotte in fasci per migliorare l'aderenza con la matrice. La tessitura può variare da mono a bidirezionale per il miglioramento dell'aderenza all'interfaccia con la matrice.

Studi in letteratura mostrano che compositi a base cementizia possono essere usati con successo nel rinforzo di strutture in calcestruzzo armato (taglio, flessione e confinamento), sebbene il loro comportamento sia diverso dai composti FRP a causa di un diverso meccanismo di scorrimento. I meccanismi di scorrimento sono critici per i rinforzi strutturali poiché possono essere di natura fragile e possono innescare un collasso globale del sistema. Con i composti FRP è ben noto che la rottura avviene all'interfaccia matrice-substrato di calcestruzzo. Alcune ricerche sul distacco nei compositi FRCM, tuttavia, suggeriscono che lo scorrimento avviene all'interno della matrice mediante un processo progressivo di scivolamento all'interfaccia fibra-matrice, che comporta un incremento di duttilità se paragonato agli FRP. In generale, la matrice svolge alcuni compiti fondamentali: trasmette e distribuisce le forze di taglio tra e lungo le fibre, e lega il composito al substrato in calcestruzzo, fondamentale per la condivisione dei carichi. L'interazione tra matrice e fibre nei composti FRCM è complicata dal fatto che la matrice non penetra tutte le fibre dei fasci, bensì è limitata alla superficie esterna di essi. Una completa comprensione del meccanismo del trasferimento di carico tra composti FRCM e substrato di calcestruzzo è fondamentale per la progettazione, e non è ancora stato esaminato a fondo.

Questo documento presenta i risultati di uno studio sperimentale condotto al fine di capire il comportamento ed il meccanismo di trasferimento delle tensioni nei composti FRCM con PBO, applicati su substrato di calcestruzzo. Vengono forniti e discussi i risultati di prove di taglio diretto con diverse lunghezze e larghezze di applicazione.

## **SIGNIFICATO DELLA RICERCA**

La progettazione di interventi con sistemi FRCM richiede una valutazione del comportamento del legame delle interfacce matrice-calcestruzzo e matrice-fibra. La seguente ricerca indaga gli effetti sulla trasmissione delle tensioni da parte di lunghezza e larghezza di applicazione dei composti PBO FRCM. Questo studio è necessario per lo sviluppo e la validazione di modelli per determinare la lunghezza efficace di applicazione, che può essere usata per stabilire la capacità portante

dell'interfaccia. I risultati ottenuti fanno anche chiarezza sul comportamento tra matrice e fibre, mettendo in risalto il ruolo della matrice nel trasferimento delle tensioni.

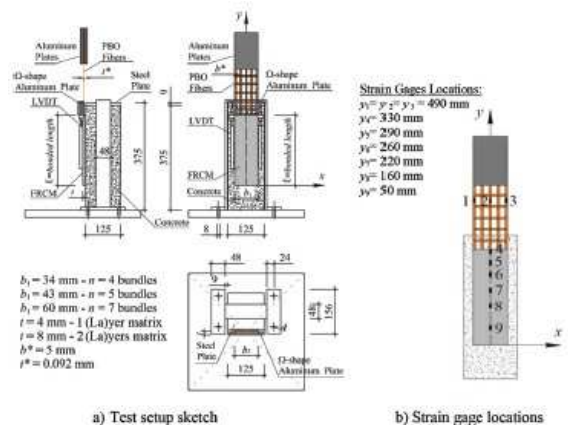


Fig. 1—Test setup and instrumentation. (Note: Dimensions in mm; 1 mm = 0.0394 in.)

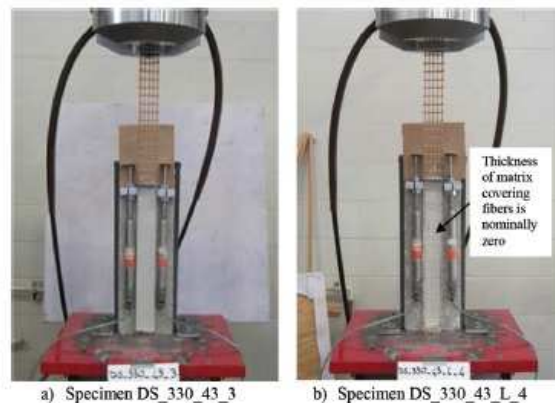


Fig. 2—Photos of direct shear tests.

## PROGRAMMA DI SPERIMENTAZIONE

### Test setup

Il setup delle prove di taglio diretto, comunemente usato per studiare il comportamento del legame FRP-calcestruzzo, è stato adottato anche per questo studio. E' stata adottata la classica configurazione push-pull, in cui il prisma di calcestruzzo viene trattenuto mentre le fibre vengono tirate (Fig. 1a e 2). Il prisma di calcestruzzo ha dimensioni in pianta di 125 x 125 mm ed altezza 375 mm. Il materiale composito è costituito da una rete in fibra PBO e malta cementizia modificata con polimeri. La rete in fibra PBO è costituita da fasci bidirezionali spaziati di 10 e 20 mm dall'asse del fascio, nelle due direzioni. Il peso della rete è di 88 g/m<sup>2</sup>, di cui 70.2 g/m<sup>2</sup> in direzione longitudinale e 17.8 g/m<sup>2</sup> in direzione trasversale. La larghezza nominale  $b^*$  e lo spessore medio  $t^*$  di un fascio sono di 5 e 0.092 mm rispettivamente. Lo spazio libero tra i fasci è approssimativamente di 5 e 15 mm, rispettivamente in direzione longitudinale e trasversale. Tutti i fasci trasversali sono dalla stessa parte rispetto a quelli longitudinali, e la rete è legata da filamenti di fibra. La matrice è stata applicata solo nella zona di incollaggio per incorporare e legare le fibre del composito al prisma di calcestruzzo. La striscia di rete in fibra è stata lasciata nuda al di fuori della zona di incollaggio. All'estremità sono poi state incollate con resina epossidica delle piastre di alluminio, per permettere la presa da parte della macchina di prova (Fig. 1). Per strisce di larghezza superiore a 43 mm, le

piastre di alluminio sono state serrate con quattro bulloni passanti, al fine di garantire una pressione omogenea e prevenire uno scivolamento all'interno delle piastre. Il prisma di calcestruzzo è stato vincolato mediante un telaio in acciaio imbullonato alla base della macchina di prova. E' stata interposta una piastra di acciaio tra il telaio e la testa del prisma per una distribuzione uniforme della pressione generata dalla reazione del telaio durante la prova. Le dimensioni del telaio sono mostrate in Fig. 1a. I test sono stati condotti con controllo di spostamento utilizzando una macchina di test universale. Lo spostamento globale, definito come spostamento relativo tra punti sui fasci di fibra immediatamente esterni alla matrice e la superficie adiacente del prisma di calcestruzzo, è stato incrementato con un tasso costante di 0.00084 mm/s fino alla rottura del provino. Lo spostamento globale è stato rilevato utilizzando due trasduttori di spostamento (LVDT), fissati alla superficie del calcestruzzo in prossimità del bordo della zona di incollaggio, reagenti contro una leggera piastra di alluminio sagomata ad Omega e fissata sulle fibre trasversali esterne, prossime alla zona di incollaggio, come mostrato in Fig. 1a e 2. Per controllare la velocità di spostamento è stata usata la media delle misurazioni dei due LVDT. Le dimensioni del prisma di calcestruzzo e del telaio di acciaio permettevano una lunghezza di applicazione massima pari a 330 mm. La scelta si è basata sui risultati degli studi di D'Ambrisi che, avendo testato a taglio doppio gli stessi materiali dello stesso produttore, hanno dimostrato che la cosiddetta lunghezza efficace di incollaggio (discussa in una sezione successiva) per questi compositi è nell'intorno di 250 – 300 mm.

### **Provini e preparazione**

Vengono presentati 58 test di taglio diretto per determinare le caratteristiche del legame ed il meccanismo di trasferimento delle tensioni del composto FRCM. I parametri variabili sono la lunghezza e larghezza di incollaggio. La lunghezza varia da 100 a 330 mm, e la larghezza da 34 a 60 mm. La superficie del prisma di calcestruzzo è stata preventivamente sabbiata. E' stato applicato uno strato di 4 mm di matrice (strato interno) usando degli stampi per controllarne larghezza e spessore (Fig. 3a). E' stato applicato quindi un singolo strato di fibra PBO sullo strato di matrice, premendo delicatamente le fibre per assicurare una corretta impregnazione. Come riportato più avanti, per alcuni provini si è scelto di orientare i fasci longitudinali in modo che risultassero a diretto contatto con lo strato interno della matrice, mentre per altri lo strato interno è stato messo a diretto contatto con i fasci trasversali. E' stato registrato l'orientamento scelto per ogni provino. La striscia di rete in fibra è stata posizionata in modo che sporgesse leggermente dalla matrice nella parte inferiore del prisma di calcestruzzo, come mostrato in fig. 3b. E' stato applicato un secondo strato di matrice

(strato esterno) sulle fibre PBO per 42 dei 58 provini. Lo spessore degli strati di matrice rispetta le raccomandazioni del produttore. La Fig. 2a mostra un provino con lo strato esterno della matrice presente, mentre la Fig. 2b mostra un provino che ne è privo. In quest'ultimo caso, lo spessore della matrice che ricopre le fibre è assunto pari a zero. Il composto è stato lasciato asciugare in condizioni ambiente per almeno una settimana prima dei test.

La Tabella 1 sintetizza le caratteristiche dei provini. I provini sono stati nominati con la notazione DS\_X\_Y (S e/o D e/o L)\_Z<sup>(T)</sup>, dove X = lunghezza di incollaggio  $l$ , in mm; Y = larghezza di incollaggio  $b_1$ , in mm; S indica la presenza di strain gauges sul provino; D indica che il provino è stato testato fino al mantenimento di un carico costante finale; L indica l'assenza dello strato esterno della matrice; Z = numero del provino. L'apice T dopo il numero del provino indica che i fasci trasversali della rete sono stati posizionati a contatto con lo strato interno della matrice. Il numero di fasci longitudinali  $n$  e lo spessore totale del composito  $t$  sono indicati in Tabella 1 per ogni provino.

Da notare che sono stati testati in totale 64 provini, ma solo 58 sono presenti in questo studio.

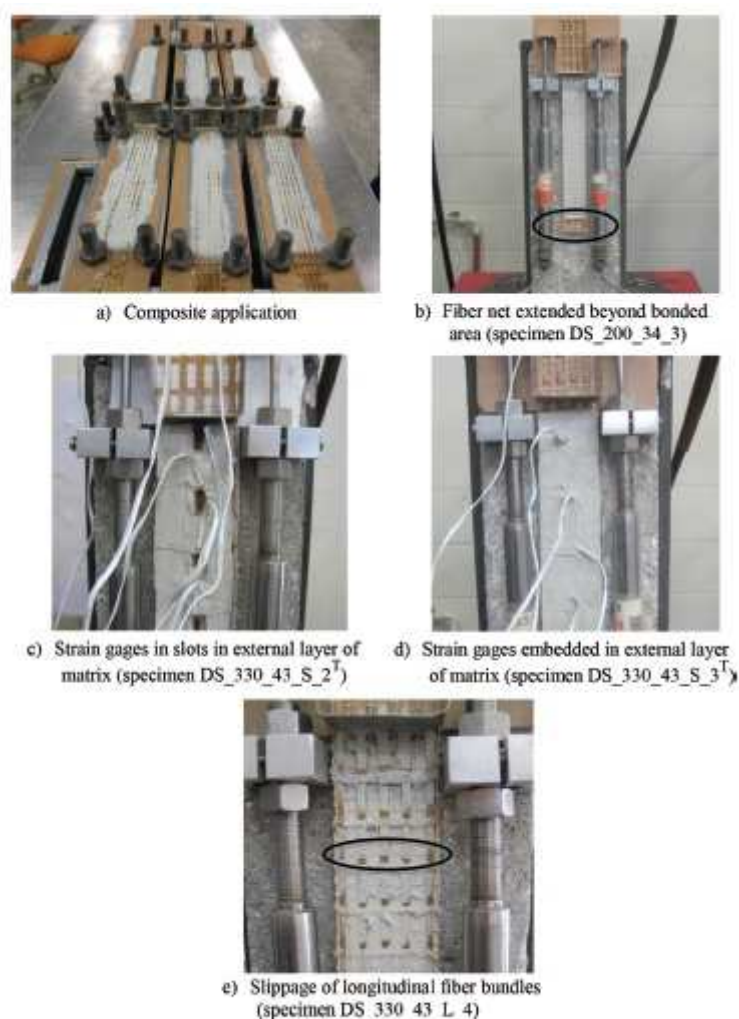


Fig. 3—Photos of specimens.

Sei provini testati (da DS\_330\_34\_3 a 6, DS\_330\_43\_4, e DS\_330\_43\_S\_4) non compaiono nella Tabella 1 perché le fibre esterne all'area incollata si sono rotte prima di ottenere il processo di scorrimento. Come si dirà più avanti, il fenomeno è dovuto ad una non uniforme distribuzione della forza tra i fasci che, in alcuni casi, ha comportato il raggiungimento della tensione di rottura per le fibre. Come detto in precedenza, lo strato esterno della matrice non è stato applicato in 16 dei 58 provini per esaminare il comportamento dell'interfaccia fibre-matrice ed il ruolo della matrice nella

distribuzione delle tensioni. 4 dei 16 provini senza lo strato esterno (DS\_330\_43\_L\_7<sup>T</sup>, 8<sup>T</sup>, e 9<sup>T</sup>; e DS\_330\_43\_L\_S\_1<sup>T</sup>) sono stati preparati con i fasci di fibre trasversali a contatto con lo strato interno della matrice. I rimanenti 12 invece sono stati preparati con i fasci longitudinali a contatto con lo strato interno della matrice. Questo metodo ha permesso di esaminare le potenziali differenze di comportamento dovute all'interruzione del legame tra i fasci longitudinali e la matrice. Sette provini inclusi nella Tabella 1 sono stati dotati di strain gauges (lunghezza 1 mm) per studiare la distribuzione degli spostamenti assiali lungo la lunghezza di incollaggio del composito. Sono compresi provini con e senza lo strato di matrice esterno. Per quelli con lo strato esterno, sono state usate due tecniche per l'applicazione degli strain gauges alle fibre. Per due provini (DS\_330\_43\_S\_1<sup>T</sup> e DS\_330\_43\_S\_2<sup>T</sup>), sono stati creati degli appositi vani nello strato esterno in modo tale da poter applicare gli strain gauges sulle fibre a provino già ultimato (Fig. 3c). Questa procedura è simile a quella usata da D'Ambrosi. Alcune preoccupazioni sono sorte, però, per quanto riguarda la possibile concentrazione delle tensioni lungo i bordi dei vani. In aggiunta al fatto che la mancanza dello strato esterno di matrice, in corrispondenza degli strain gauges, potrebbe causare un diverso comportamento delle fibre. Questi interrogativi sorgono dal fatto che il ruolo dello strato esterno della matrice non è completamente chiaro. Pertanto, per DS\_330\_43\_S\_3<sup>T</sup>, DS\_330\_43\_S\_5, e DS\_330\_60\_S\_1, gli strain gauges sono stati applicati alle fibre prima di essere completamente ricoperti dallo strato esterno della matrice (Fig. 3d). Due provini privi dello strato esterno sono stati dotati di strain gauges (DS\_330\_43\_L\_S\_1<sup>T</sup> and DS\_330\_43\_L\_S\_2), applicati dopo la preparazione del provino. Le posizioni di applicazione sono mostrate in Fig. 1b. I sensori da 4 a 7 sono stati applicati sui fasci longitudinali della lunghezza incollata, mentre da 1 a 3 sono stati montati sulle fibre esterne alla matrice. Gli strain gauges 1 e 3 sono inclusi su DS\_330\_43\_S\_1<sup>T</sup> and DS\_330\_43\_S\_2<sup>T</sup>.

## Proprietà dei materiali

I prismi sono stati prodotti con calcestruzzo a base di cemento Portland (Tipo 1) senza additivi. La dimensione massima dell'aggregato è di 9.5 mm. Sono stati confezionati sei cilindri 100 x 200 mm dallo stesso calcestruzzo usato per i prismi, al fine di determinare la resistenza a compressione e trazione secondo ASTM C39 e C496. Le proprietà del materiale sono riportate in Tabella 2.

Durante la formazione della matrice sono stati confezionati dieci cilindri 50 x 100 mm al fine di determinare la resistenza a compressione e trazione secondo ASTM C39 e C496. Le proprietà del materiale sono riportate in Tabella 2.

Sono stati effettuati dei test di trazione sulla rete in fibra per verificarne le caratteristiche ed avere conferma dell'efficacia del sistema di presa della macchina. Sono stati fatti 14 test di trazione su strisce di rete di diversa larghezza  $b_2$  per determinare la presenza di effetti dovuti alla larghezza del provino. Sono stati condotti dei test su strisce con 1, 4, 5 e 7 fasci longitudinali, con almeno tre campioni identici per tipo. Le prove si sono svolte in controllo di spostamento con un tasso di 1.25 mm/min, come da ASTM D3039. Sono stati applicati degli strain gauges su uno o più fasci centrali di otto provini per studiare la relazione carico-deformazione. I provini testati a trazione hanno la denominazione PBO\_X\_(S)\_Z, dove X = larghezza  $b_2$  della striscia di rete, in mm; S indica la presenza di strain gauges; Z = numero del provino. La Tabella 3 riassume le caratteristiche dei provini sottoposti a trazione, compreso il numero di fasci longitudinali n, la larghezza  $b_2$  ed il carico massimo a rottura  $P^*$ . La Fig. 4a mostra un provino durante il test di trazione, mentre la Fig. 4b riporta le curve tensione-deformazione ottenute dai provini dotati di strain gauges. La tensione è ottenuta dividendo il carico applicato P per la sezione trasversale dei fasci longitudinali del provino ( $nb \cdot t^*$ ). Il grafico ed i risultati della Tabella 3 dimostrano che non vi è la presenza di effetti dovuti alla larghezza. La Tabella 2 riporta la resistenza a trazione, la deformazione massima ed il modulo elastico come media dei campioni testati. I valori delle suddette grandezze, ricavati dai test, sono abbastanza diversi da quelli dichiarati dal produttore (5800 MPa, 0.025 e 270 GPa rispettivamente). Gli autori attribuiscono queste differenze ad una diversa metodologia di test condotto dal produttore delle fibre, nei quali i fasci sono opportunamente intrecciati ed influenzano la resistenza a trazione ed il modulo elastico.

## RISULTATI SPERIMENTALI

### Modi di rottura, comportamento generale e carico massimo

Per la maggior parte dei test di taglio diretto presenti in questo documento, la rottura è caratterizzata da un considerevole scorrimento tra le fibre e la matrice. In genere non si è riscontrato alcun danno all'interfaccia matrice-calcestruzzo, e lo scorrimento è avvenuto all'interfaccia matrice-fibra, eccetto per DS\_100\_34\_1<sup>T</sup> e DS\_100\_34\_2<sup>T</sup>. Gli autori credono che sia prevalso un meccanismo di rottura di primo modo a causa della ridotta lunghezza di incollaggio adottata.

Dopo il raggiungimento del carico massimo, si osserva una graduale estrazione dei fasci longitudinali dalla matrice nella parte superiore, mentre nella parte inferiore si assiste ad un lento avanzare delle fibre verso l'interno della matrice (posizione  $y = 0$  in Fig. 1b).

Table 1—Direct shear test specimens

Name	Composite width $b_1$ , mm (in.)	No. of bundles $n$	Composite length $l$ , mm (in.)	No. of matrix layers $L_a$	Composite thick- ness $t$ , mm (in.)	Maximum load $P^*$ , kN (k)	Ultimate stress $\sigma^*$ , MPa (ksi)
DS_100_34_1 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	100 (4)	2	8 (0.3)	1.92 (0.43)	1040 (151)
DS_100_34_2 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	100 (4)	2	8 (0.3)	0.97 (0.22)	530 (77)
DS_100_34_3 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	100 (4)	2	8 (0.3)	1.62 (0.36)	880 (128)
DS_150_34_1 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	150 (6)	2	8 (0.3)	2.22 (0.50)	1210 (175)
DS_150_34_2 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	150 (6)	2	8 (0.3)	1.55 (0.35)	840 (122)
DS_150_34_3 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	150 (6)	2	8 (0.3)	2.87 (0.65)	1560 (226)
DS_150_34_4 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	150 (6)	2	8 (0.3)	2.34 (0.53)	1270 (184)
DS_150_60_1	60 (2.4)	7	150 (6)	2	8 (0.3)	5.25 (1.18)	1630 (236)
DS_150_60_2	60 (2.4)	7	150 (6)	2	8 (0.3)	5.04 (1.13)	1570 (228)
DS_150_60_3	60 (2.4)	7	150 (6)	2	8 (0.3)	3.05 (0.69)	950 (138)
DS_200_34_1	34 (1.3)	4	200 (8)	2	8 (0.3)	3.05 (0.69)	1660 (241)
DS_200_34_2	34 (1.3)	4	200 (8)	2	8 (0.3)	2.52 (0.57)	1370 (199)
DS_200_34_3	34 (1.3)	4	200 (8)	2	8 (0.3)	3.44 (0.77)	1870 (271)
DS_250_34_1 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	250 (10)	2	8 (0.3)	2.61 (0.59)	1420 (206)
DS_250_34_2 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	250 (10)	2	8 (0.3)	2.11 (0.47)	1150 (167)
DS_250_34_3 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	250 (10)	2	8 (0.3)	2.82 (0.63)	1530 (222)
DS_330_34_1 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	330 (13)	2	8 (0.3)	3.00 (0.67)	1630 (236)
DS_330_34_2 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	330 (13)	2	8 (0.3)	3.51 (0.79)	1910 (277)
DS_330_34_7	34 (1.3)	4	330 (13)	2	8 (0.3)	4.07 (0.91)	2210 (321)
DS_330_34_8	34 (1.3)	4	330 (13)	2	8 (0.3)	4.02 (0.90)	2180 (316)
DS_330_34_9	34 (1.3)	4	330 (13)	2	8 (0.3)	3.44 (0.77)	1870 (271)
DS_330_43_1 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	4.43 (1.00)	1930 (280)
DS_330_43_2 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	5.25 (1.18)	2280 (331)
DS_330_43_3	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	5.27 (1.18)	2290 (332)
DS_330_43_5	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	4.79 (1.02)	2080 (302)
DS_330_43_6	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	5.09 (1.14)	2210 (321)
DS_330_43_S_1 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	4.48 (1.01)	1950 (283)
DS_330_43_S_2 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	5.12 (1.15)	2230 (323)
DS_330_43_S_3 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	3.03 (0.68)	1320 (191)
DS_330_43_S_5	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	4.03 (0.91)	1750 (254)
DS_330_43_L_1	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	4.96 (1.12)	2160 (313)
DS_330_43_L_2	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	4.63 (0.94)	2010 (292)
DS_330_43_L_3	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	4.61 (1.04)	2000 (290)
DS_330_43_L_4	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	3.98 (0.88)	1730 (251)
DS_330_43_L_5	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	3.96 (0.89)	1720 (249)
DS_330_43_L_6	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	3.82 (0.86)	1660 (241)
DS_330_43_L_7 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	2.67 (0.60)	1160 (168)
DS_330_43_L_8 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	3.67 (0.82)	1600 (232)
DS_330_43_L_9 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	3.09 (0.69)	1340 (194)
DS_330_43_L_10	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	4.45 (1.00)	1930 (280)
DS_330_43_L_11	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	4.72 (1.06)	2050 (297)
DS_330_43_L_S_1 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	3.24 (0.73)	1410 (205)
DS_330_43_L_S_2	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	4.69 (1.05)	2040 (296)
DS_330_60_1 <sup>T</sup>	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	7.05 (1.58)	2190 (318)
DS_330_60_2 <sup>T</sup>	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	6.56 (1.47)	2040 (296)
DS_330_60_3 <sup>T</sup>	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	6.06 (1.36)	1880 (273)
DS_330_60_4 <sup>T</sup>	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	6.50 (1.46)	2020 (293)
DS_330_60_5 <sup>T</sup>	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	6.28 (1.41)	1950 (283)
DS_330_60_6	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	7.01 (1.58)	2180 (316)
DS_330_60_D_1	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	8.29 (1.86)	2570 (373)
DS_330_60_D_2	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	7.12 (1.60)	2210 (321)
DS_330_60_D_3	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	6.56 (1.47)	2040 (296)
DS_330_60_D_4	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	5.24 (1.18)	1630 (236)
DS_330_60_D_5	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	6.69 (1.50)	2080 (302)
DS_330_60_S_1	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	6.30 (1.42)	1960 (284)
DS_330_60_L_1	60 (2.4)	7	330 (13)	1	4 (0.15)	5.80 (1.30)	1800 (261)
DS_330_60_L_2	60 (2.4)	7	330 (13)	1	4 (0.15)	5.49 (1.23)	1700 (247)
DS_330_60_L_3	60 (2.4)	7	330 (13)	1	4 (0.15)	6.60 (1.48)	2050 (297)



Per i provini privi dello strato esterno, lo scorrimento è chiaramente visibile, soprattutto se le fibre trasversali sono orientate verso la parte esterna, come mostrato in Fig. 3e. per i provini con entrambi gli strati della matrice, un comportamento simile è visibile solo dopo la rimozione dello strato esterno, a prova completata, dove è possibile osservare che i fasci trasversali non subiscono spostamento. Questo lascia intendere che il trasferimento delle tensioni avvenga prevalentemente tra i fasci di fibre verticali e la matrice.

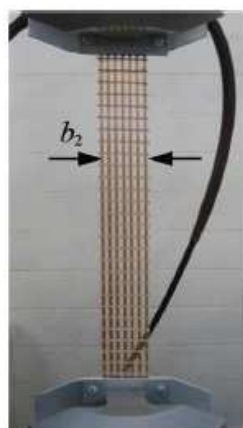
In molti test la rete esterna alla matrice, dal lato caricato del provino, ha presentato una non uniforme distribuzione del carico tra i fasci verticali, con un incremento dello spostamento. Questo è evidenziato da una rotazione rigida della piastra sagomata ad Omega, così come da una deformazione dei fasci trasversali esterni all'area di incollaggio, che risultavano ortogonali ai fasci

**Table 2—Material properties**

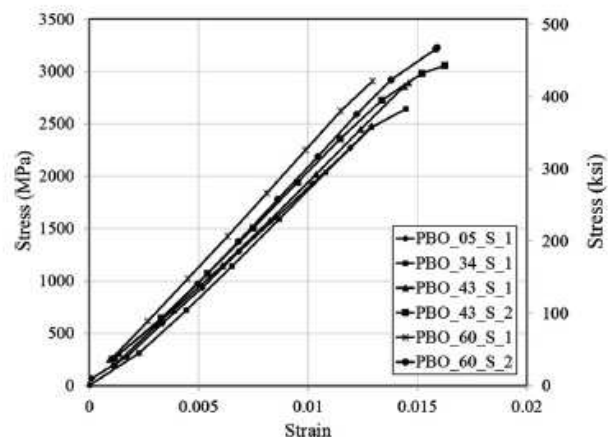
Concrete prism	
Compressive strength, MPa (psi)	42.5 (6160)
COV	0.013
Splitting tensile strength, MPa (psi)	3.4 (490)
COV	0.113
FRCM composite	
Matrix	
Compressive strength, MPa (psi)	27.9 (4050)
COV	0.009
Splitting tensile strength, MPa (psi)	3.6 (520)
COV	0.072
PBO fibers	
Tensile strength, MPa (ksi)	3015 (440)
COV	0.067
Ultimate strain	0.0145
COV	0.104
Elastic modulus, GPa (ksi)	206 (29,900)
COV	0.065

**Table 3—Tensile test specimens**

Name	$b_2$ , mm (in.)	$P^*$ , kN (kip)	$n$	$\sigma^* = P^*/nb^*t^*$ , MPa (ksi)
PBO_5_S_1	5 (0.20)	1.39 (0.312)	1	3020 (438)
PBO_5_S_2	5 (0.20)	1.41(0.317)	1	3070 (445)
PBO_5_S_3	5 (0.20)	1.25 (0.281)	1	2720 (395)
PBO_34_1	34 (1.34)	5.52 (1.241)	4	3000 (435)
PBO_34_2	34 (1.34)	5.67 (1.275)	4	3080 (447)
PBO_34_3	34 (1.34)	5.41 (1.216)	4	2940 (426)
PBO_34_S_1	34 (1.34)	4.70 (1.057)	4	2550 (370)
PBO_43_1	43 (1.69)	6.82 (1.533)	5	2970 (431)
PBO_43_2	43 (1.69)	6.72 (1.511)	5	2920 (424)
PBO_43_S_1	43 (1.69)	7.35 (1.652)	5	3200 (464)
PBO_43_S_2	43 (1.69)	7.09 (1.594)	5	3080 (447)
PBO_60_1	60 (2.36)	10.65 (2.392)	7	3300 (479)
PBO_60_S_1	60 (2.36)	9.85 (2.214)	7	3060 (444)
PBO_60_S_2	60 (2.36)	10.65 (2.394)	7	3310 (480)



a) Photo of tensile test (specimen PBO\_60\_1)



b) Stress-strain relation of PBO fibers

Fig. 4—Tensile tests.

longitudinali all'inizio del test. Il fenomeno visivo è poi confermato da una differenza nella misura dello spostamento da parte dei due LVDT, il che suggerisce che durante il test si sia verificata una redistribuzione delle tensioni. Poiché nelle prove di trazione delle fibre non si sono notati fenomeni dovuti al contributo della larghezza, si suppone che la non corretta distribuzione del carico nelle prove di taglio diretto sia dovuta a variazioni locali dell'aderenza dei fasci di fibre e forse ad una lieve eccentricità del carico. In sei provini, la non uniforme distribuzione della forza ha portato ad elevati livelli di tensione in uno o più fasci, tali da portare ad una rottura prematura dell'intera striscia esternamente all'area di incollaggio (da DS\_330\_34\_3 a 6, DS\_330\_43\_4, e DS\_330\_43\_S\_4).

La rottura a trazione dei fasci longitudinali esterni alla matrice è caratterizzata da un rapido stiramento delle fibre senza incremento di carico. Questa modalità di rottura si manifesta improvvisamente poiché le prove di taglio diretto sono condotte in controllo di spostamento tra le fibre ed il substrato in calcestruzzo. Una volta verificatasi la rottura della fibra, lo spostamento dell'intero sistema si concentra nel punto di rottura, generando una condizione di carico instabile. Come per i test di trazione su fibra, non si osserva una rottura globale della rete.

Il carico massimo  $P^*$  è espresso in Tabella 1 per ogni provino. La dispersione dei valori di  $P^*$  si può spiegare, in parte, con variazioni locali delle caratteristiche del legame d'interfaccia, che comportano una non uniforme distribuzione del carico tra i fasci, come detto in precedenza.

### **Fessure pre-esistenti**

Alcuni campioni hanno presentato fessure da ritiro sulla superficie esterna del composito, in particolare quelli dotati di strain gauges (Fig. 3c). Le crepe si sviluppano sulla lunghezza del provino con uno schema trasversale ed in tutti i casi non si estendono mai per tutta la larghezza del composito. Le fessure si aprono con l'aumentare dello scorrimento ed eventualmente penetrano nello spessore della matrice, come si nota osservando lateralmente il provino. La presenza delle fessure genera una discontinuità nella distribuzione delle tensioni tra fibra e matrice, con conseguente deformazione localizzata in corrispondenza delle crepe stesse. La presenza di fessure da ritiro è strettamente legata all'applicazione della matrice. In questo studio, ogni campagna di getti ha seguito le medesime procedure, ma non tutti i provini hanno presentato fessure da ritiro. Questo suggerisce che la matrice utilizzata è sensibile alla miscelazione ed alle modalità di applicazione.

## Risposta carico-spostamento

La Fig. 5a mostra la risposta carico P-spostamento di provini rappresentativi con diverse larghezze di incollaggio e medesima lunghezza ( $\ell = 330$  mm). Generalmente, una prima risposta lineare è seguita da una non lineare fino al valore massimo (picco) del carico applicato  $P^*$ . Durante la fase non lineare precedente al picco, si manifestano alcuni fenomeni all'interfaccia fibra-matrice. Una descrizione dettagliata del meccanismo di trasferimento interfacciale tra fibra e matrice nella fase non lineare sarà presentato in una futura pubblicazione. E' da notare tuttavia che l'inizio della fase non lineare si manifesta con un micro-danneggiamento della matrice vicino all'estremità caricata. Una volta che si verifica l'apertura delle micro fratture, inizia lo scivolamento delle fibre. Man mano che questo progredisce, il carico continua a salire per la presenza di attrito che è stato osservato nell'area di distacco tra filamenti di fibra e fibra-matrice, che contribuisce al taglio interfacciale e, quindi, all'incremento del carico. La risposta discendente post picco ha un'inclinazione variabile ed indica che il trasferimento delle tensioni non è più completamente stabilito. Il solo contributo dell'attrito è chiaramente individuabile nella risposta dei provini DS\_330\_60\_D\_3 e DS\_330\_60\_D\_5, che diventa costante per valori dello spostamento globale maggiori di circa 9 mm.

Per i campioni con fessure da ritiro precedenti ai test, sono stati osservati dei bruschi cali nelle risposte di carico quando le fessure hanno iniziato a propagarsi verso i bordi longitudinali del composito. Comparando i risultati di provini con e senza fessure pre-esistenti, si è visto che il comportamento generale dei campioni sembra non essere affetto dalla presenza delle suddette fessure.

La Fig. 5b mostra la risposta di carico dei provini con strain gauges della serie DS\_330\_43. I campioni DS\_330\_43\_1<sup>T</sup> e DS\_330\_43\_5 vengono inseriti come paragone. In genere il carico massimo per i provini con strain gauges è paragonabile a provini simili sprovvisti di strumentazione. Per DS\_330\_43\_S\_1<sup>T</sup> e DS\_330\_43\_S\_2<sup>T</sup>, tuttavia, la fase non lineare pre-picco appare più accentuata. E' possibile che per questi due provini, i vani creati per l'installazione degli strain gauges abbiano indotto una concentrazione degli sforzi in prossimità dei vani stessi, o modificato l'azione vincolante della matrice sulla fibra, evidenziando la necessità di studiare il ruolo dello strato esterno della matrice.

I provini DS\_330\_43\_S\_3<sup>T</sup> e DS\_330\_43\_S\_5 con strain gauges immersi nella matrice mostrano un comportamento simile a DS\_330\_43\_1<sup>T</sup> and DS\_330\_43\_5, che ne sono sprovvisti.

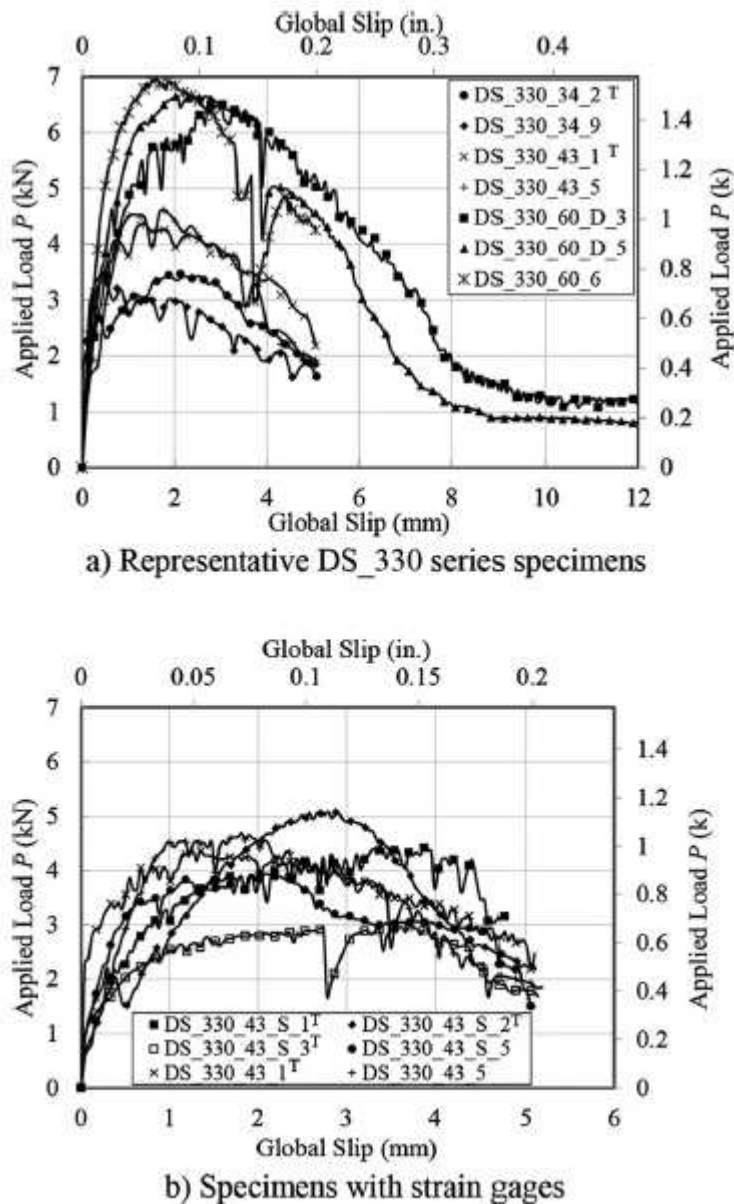


Fig. 5—Applied load  $P$ -global slip responses of representative specimens.

dello scorrimento verso l'estremità non caricata del composito. Nel caso dei provini FRCM in Fig. 5a e 6, con lunghezza di incollaggio  $\ell = 330$  mm, non si nota una zona a carico costante, poiché l'attrito tra le fibre distaccate e la matrice genera un'alterazione della risposta, come detto in precedenza. Ulteriori discussioni sulla lunghezza efficace di incollaggio sono presenti nelle sezioni successive.

La Fig. 7 mostra la risposta di campioni privi dello strato esterno della matrice (serie DS\_330\_XX\_L). Le Fig. 7a e b mostrano la risposta di provini con larghezza di incollaggio di 43

La Fig. 6 mostra la risposta di campioni rappresentativi della serie DS\_XXX\_34 con differente lunghezza di incollaggio e medesima larghezza ( $b_1 = 34$  mm). La figura mostra una sovrapposizione iniziale del tratto lineare, con una curva più alta per provini con maggiore lunghezza di incollaggio. Il confronto dei grafici suggerisce che per carichi ridotti, il trasferimento degli sforzi di taglio e lo scorrimento si sviluppano vicino all'estremità caricata del composito; incrementando il carico, essi si propagano verso l'estremità non caricata. Da notare che nei legami FRP-calcestruzzo con lunghezza di incollaggio superiore ad un certo valore critico (denominato lunghezza efficace di incollaggio), si osserva una zona con incremento di spostamento a carico costante, quando questo raggiunge il cosiddetto carico di distacco, con la propagazione

mm, con i fasci longitudinali della rete disposti a contatto con lo strato interno della matrice. La Fig. 7a, che include anche la risposta del DS\_330\_43\_5 come riferimento, mostra che la forma del diagramma di risposta non cambia senza la presenza dello strato esterno della matrice. Allo stesso modo, la Fig. 7c mostra che la risposta dei provini con larghezza di incollaggio di 60 mm senza lo strato esterno è simile a quella del DS\_330\_60\_6 con entrambi gli strati, inserito nel grafico come termine di paragone. Questo suggerisce che la natura del meccanismo di trasferimento delle tensioni si sia mantenuta. La Fig. 7d mostra la risposta di provini con larghezza di incollaggio di 43 mm, privi dello strato esterno della matrice e con i fasci trasversali delle fibre a contatto con lo strato interno. Un confronto tra Fig. 7a e d indica che i campioni con le fibre trasversali a contatto con lo strato interno della matrice presentano un carico massimo ed una rigidità inferiori.

### Deformazioni misurate

La deformazione assiale  $\varepsilon_{yy}$  è stata misurata lungo i fasci centrale e laterali mediante strain gauges nelle posizioni 1, 2 e 3, esterni all'area di incollaggio (Fig. 1b), nei provini DS\_330\_43\_S\_1<sup>T</sup> and DS\_330\_43\_S\_2<sup>T</sup>, per monitorare la ripartizione del carico durante i test. I valori di deformazione misurati non si sono rivelati uniformi tra i fasci strumentati, con crescite differenziate durante l'applicazione del carico. Un fenomeno simile si osserva negli FRP su calcestruzzo ed è attribuibile parzialmente alle variazioni locali delle proprietà dell'interfaccia. Nel caso di fasci di fibre, come nell'oggetto di questo studio, il fenomeno appare più marcato. Questo comportamento è visibile ad un'osservazione diretta, associandosi a fenomeni di scorrimento che si manifestano prima di raggiungere il carico massimo.

La variazione della deformazione assiale  $\varepsilon_{yy}$  nel DS\_330\_60\_S\_1 misurata in punti diversi delle fibre longitudinali, per diversi valori del carico applicato P, è visibile in Fig. 8a. I valori di y corrispondono alla posizione di rilevamento lungo la lunghezza di incollaggio, definiti secondo l'asse in Fig. 1b. Nella Fig. 8b sono stati considerati sette valori di carico, corrispondenti ad altrettanti punti della curva di risposta (A1, B1, C1, D1, E1, F1, G1). La deformazione associata al valore del carico massimo P\* è di circa 9300  $\mu\varepsilon$ , corrispondente a circa il 64 % della media della deformazione ultima ottenuta dalle prove a trazione. La stessa analisi è stata svolta per gli altri provini dotati di strain gauges (omettendo quelli senza lo strato esterno della matrice), ottenendo risultati simili. La deformazione media associata a P\* è risultata 9800  $\mu\varepsilon$ , corrispondente a circa il 68 % della media della deformazione ultima ottenuta dalle prove a trazione. Per alcuni provini l'andamento delle deformazioni mostra delle lievi fluttuazioni nei gauges 4 e 5 (i più vicini al lato caricato della matrice)

in corrispondenza del carico di picco, probabilmente dovute alle condizioni di aderenza locali delle fibre ed all'allineamento con la direzione del carico applicato. Per questi gauges sono stati rilevati anche degli aumenti improvvisi delle deformazioni dopo uno scorrimento considerevole. Questo può essere dovuto all'effetto vincolante dello strato esterno della matrice; nonostante le dimensioni contenute dei gauges, non appena le fibre iniziano a scorrere, l'interazione meccanica del contatto con la matrice induce un incremento di tensione di taglio all'interfaccia fibra-gauge, che può dar luogo a distacco del gauge dalla fibra. E' da notare che il contenuto numero di punti di misurazione delle deformazioni lungo la matrice potrebbe dar luogo ad un'interpretazione non corretta delle letture. Sono previste ulteriori misurazioni in futuri test per verificare i profili delle deformazioni e determinare se sia possibile adattare una legge coesiva del materiale, usata per l'interfaccia FRP-calcestruzzo, per descrivere il comportamento dell'interfaccia matrice-fibre negli FRCM.

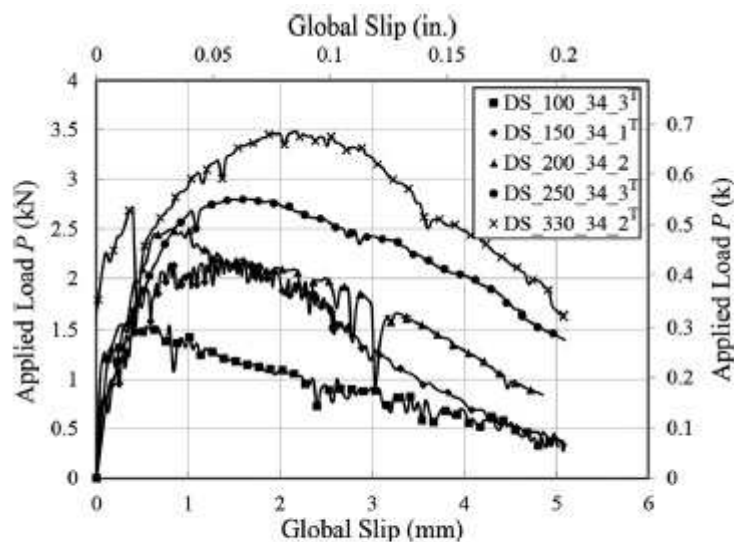


Fig. 6—Applied load  $P$ -global slip responses for DS\_XXX\_34 specimens.

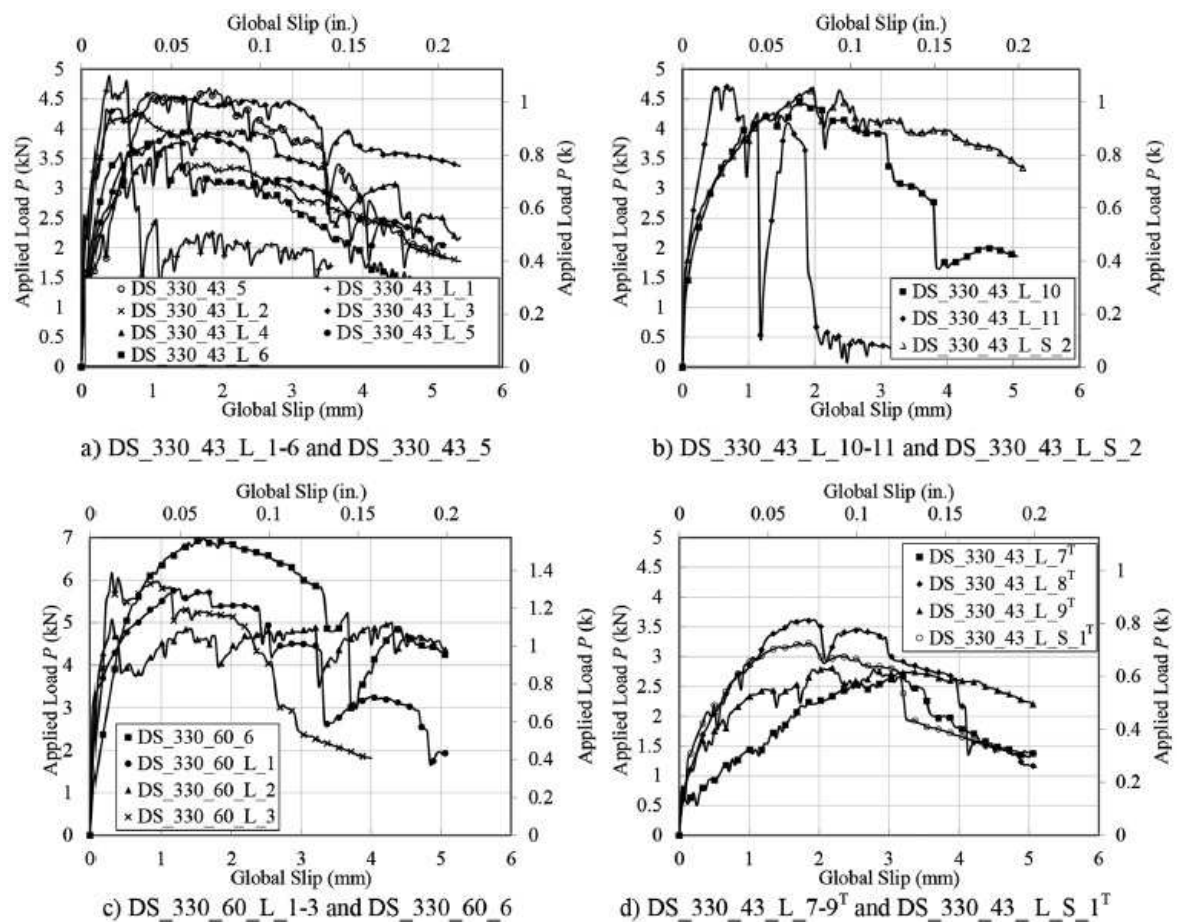


Fig. 7—Applied load  $P$ -global slip responses for specimens without external layer of matrix.

## DISCUSSIONE

Viene ora introdotta la tensione massima nell'Eq. 1 per studiare l'influenza di lunghezza di incollaggio, larghezza e condizioni dell'interfaccia:

$$\sigma^* = \frac{P^*}{nb^*t^*} \quad (1)$$

E' stata scelta l'area nominale dei fasci di fibre longitudinali per normalizzare il carico massimo, poiché questo viene trasferito dalle fibre alla matrice attraverso l'interfaccia critica. Questo parametro viene inoltre usato per confrontare test di trazione di provini con diverse larghezze (Tabella 3).

**Influenza della lunghezza di incollaggio**

I provini utilizzati per studiare la relazione tra lunghezza di incollaggio  $\ell$  e capacit  di carico in termini di tensione  $\sigma^*$  hanno larghezza del composito  $b_1$  pari a 34 mm o 60 mm, denominati serie DS\_XXX\_34 e serie DS\_XXX\_60 rispettivamente. La Fig. 9a mostra la relazione tra  $\sigma^*$  ed  $\ell$  per le due serie, escludendo i relativi provini privi dello strato esterno della matrice. Si osserva un andamento crescente per entrambe le serie, indicando che la relazione vale per larghezze diverse. Vengono evidenziati a tratto pieno nel grafico i valori medi di  $\sigma^*$  calcolati sui dati ottenuti per ogni categoria di lunghezza. La Fig. 9a mostra che la tensione massima aumenta con l'incremento della lunghezza, ad un tasso decrescente. La relazione   coerente con i recenti studi in letteratura sui composti PBO FRCM, basati su provini sottoposti a prova di taglio doppio.

Nel caso di legami FRP-calcestruzzo, la relazione tra  $\sigma^*$  ed  $\ell$  pu  essere usata per determinare la lunghezza efficace di incollaggio, indicata come  $\ell_{eff}$ , intesa come la lunghezza oltre la quale la

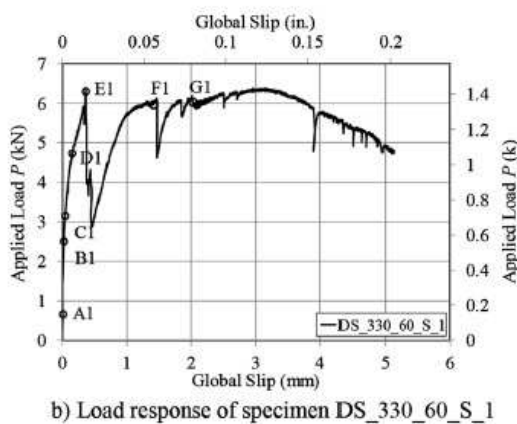
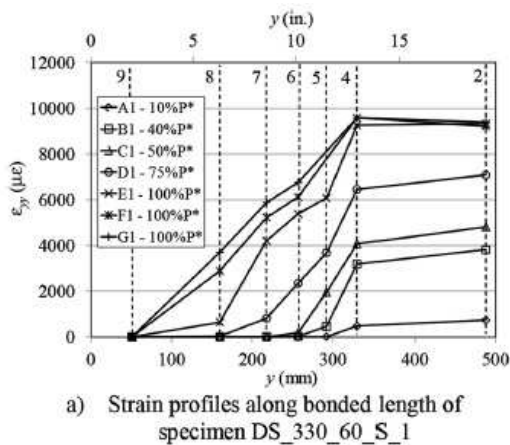


Fig. 8—Strain profiles along bonded length and load-slip response of Specimen DS\_330\_60\_S\_1.

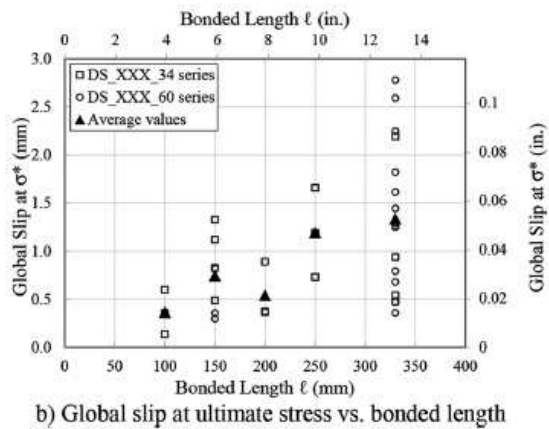
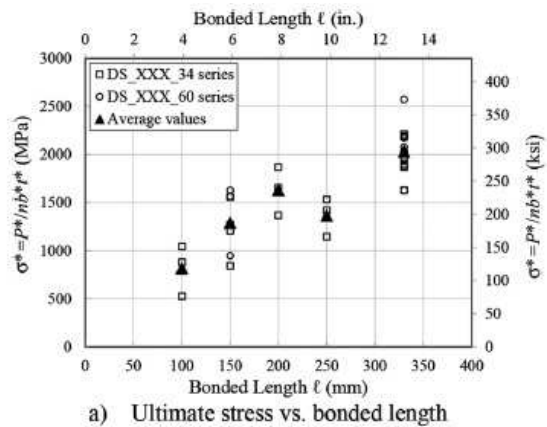


Fig. 9—Ultimate stress and global slip at maximum load versus bonded length for DS\_XXX\_34 and DS\_XXX\_60 series.



tensione massima rimane costante. Il carico massimo associato a lunghezze di incollaggio maggiori o uguali a  $l_{eff}$  è il carico di distacco, detto anche capacità di carico.

Nel caso di composti FRCM analizzati in questo studio, la presenza di attrito tra fibre e matrice dopo l'innescò dello scorrimento, dovrebbe portare ad un aumento del carico applicato dopo che il meccanismo si è completamente stabilito. Pertanto, il carico massimo  $P^*$  dovrebbe essere maggiore del carico di distacco nei casi in cui la lunghezza di incollaggio sia maggiore della lunghezza efficace, necessaria per stabilire completamente il meccanismo di vincolo. Come risultato, non dovrebbe esserci un plateau nella relazione  $\sigma^* - l$  nei legami FRCM-calcestruzzo. I profili della deformazione assiale  $\varepsilon_{yy}$  relativi alla lunghezza di incollaggio possono far luce sulla lunghezza efficace ed il carico corrispondente per questo composito. I profili delle deformazioni in Fig. 8a assomigliano a quelli ottenuti con test simili in legami FRP-calcestruzzo. In quel caso i profili delle deformazioni longitudinali possono essere usati per determinare  $l_{eff}$ . Infatti la zona di trasferimento della tensione (STZ), dove si osservano gradienti di deformazione, è completamente sviluppata all'inizio dello scorrimento per provini con una lunghezza di incollaggio maggiore di  $l_{eff}$ . La lunghezza di STZ pienamente sviluppata, coincide con la lunghezza efficace di incollaggio  $l_{eff}$ . I profili delle deformazioni in Fig. 8a suggeriscono che tale approccio può essere usato per identificare  $l_{eff}$  nei composti FRCM, nonostante la presenza di attrito durante lo scorrimento complichino l'analisi. I profili longitudinali ottenuti dal numero limitato di provini con strain gauges, suggeriscono che la lunghezza efficace è compresa tra 250 mm e 330 mm. Infatti per tutti i provini dotati di strain gauges, il numero 9 posizionato in prossimità della zona non caricata (Fig. 1b) non ha registrato deformazioni significative in corrispondenza di  $P^*$ ; si deduce che il meccanismo di trasferimento delle tensioni si è sviluppato completamente all'interno di un'area di lunghezza inferiore a 330 mm.

Per confronto, la lunghezza efficace di incollaggio per l'interfaccia FRP-calcestruzzo può essere calcolata mediante la formula fornita da ACI 440.2R, mostrata in Eq.2

$$l_{eff}^{FRP} = \sqrt{\frac{n_f t_f E_f}{\sqrt{f_c'}}} \quad (2)$$

dove  $n_f$  è il numero di strati di rinforzo di FRP;  $t_f$  è lo spessore nominale di uno strato;  $E_f$  è il modulo elastico a trazione;  $f_c'$  è la resistenza a compressione specifica del substrato di calcestruzzo. Usando questa formula per i composti PBO FRCM di questo studio, la lunghezza efficace calcolata risulta sottostimata rispetto ai risultati sperimentali. Una ragione possibile è il diverso meccanismo di rottura del legame FRP-calcestruzzo ed FRCM-calcestruzzo.

La Fig. 9b mostra la relazione tra lo spostamento globale in corrispondenza di  $\sigma^*$  e la lunghezza di incollaggio  $\ell$ , comprendendo entrambe le serie ed escludendo i campioni a singolo strato di matrice. Se si assume come trascurabile lo spostamento della matrice rispetto al calcestruzzo, lo spostamento globale misurato è da imputare allo spostamento relativo delle fibre rispetto al prisma di calcestruzzo, all'inizio dell'area di incollaggio, fino al verificarsi dello scorrimento. Si nota una tendenza all'incremento dello spostamento globale con l'aumentare della lunghezza di incollaggio, ma la relazione non è chiara. Come detto in precedenza, la misura dello spostamento è sensibile alla presenza ed apertura di fessure pre-esistenti nella matrice, causando improvvise fluttuazioni dei dati. Per questo motivo, i valori dello spostamento sono riportati qualitativamente.

### Influenza della larghezza di incollaggio

La Fig. 10 mostra la relazione tra la tensione massima  $\sigma^*$  e larghezza di incollaggio del composito  $b_1$  per provini della medesima lunghezza ( $\ell = 330$  mm), appartenenti alla serie DS\_330. Nel grafico non compaiono i provini a singolo strato di matrice. Sono mostrate tre diverse larghezze di incollaggio, 34, 43 e 60 mm. I dati in figura mostrano una notevole dispersione per larghezze ridotte. Questo potrebbe essere causato da una limitata possibilità di redistribuzione delle tensioni tra

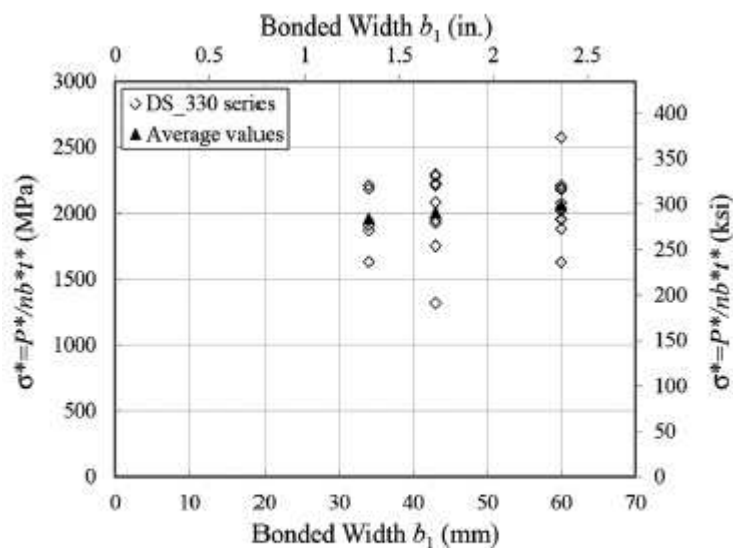


Fig. 10—Ultimate stress versus bonded width for DS\_330 series.

un numero di fasci longitudinali della rete inferiore ad un certo numero critico. Si nota inoltre che non vi è presenza di fenomeni dovuti alla larghezza, a differenza dei composti FRP. Il fenomeno è spiegabile analizzando le differenze tra i composti FRP ed FRCM, rispettivamente con una distribuzione continua delle fibre per tutta la larghezza o con una distribuzione discreta a fasci, nonché per la diversa composizione della matrice.

### **Influenza dell'orientamento dei fasci trasversali e dello strato esterno della matrice**

Come detto in precedenza, per i compositi PBO FRCM l'interfaccia critica studiata è quella tra fibra e matrice. Il taglio interfacciale si trasferisce dalle fibre interne alla matrice circostante, e ricerche recenti hanno supposto che lo sforzo di taglio trasmesso alle due superfici dell'interfaccia, da ciascun lato delle fibre della rete, sia approssimativamente lo stesso. Per provare questa ipotesi, sono state confrontate le tensioni massime  $\sigma^*$  di provini con lunghezza di incollaggio di 330 mm con diverse caratteristiche dell'interfaccia fibra-matrice. Innanzitutto è stato fatto un paragone in termini di media di tensione massima  $\sigma^*$  dei provini con entrambi gli strati di matrice, compresi quelli con gli strain gauges, variando solamente l'orientamento interno dei fasci trasversali della rete. Il valore medio di  $\sigma^*$  per i provini con fibre longitudinali a contatto con lo strato interno è risultato di 2084 MPa, mentre quelli con fibre trasversali a contatto con lo strato interno hanno fatto registrare 1944 MPa, il 7 % inferiore. Il risultato suggerisce che, nel caso di doppio strato di matrice, l'orientamento delle fibre interne non è significativo. Dei test addizionali saranno eseguiti appositamente per approfondire questo aspetto. Successivamente sono state confrontate le medie delle tensioni massime registrate dai provini senza lo strato esterno della matrice, con variazione dell'orientamento dei fasci. I provini con fibre longitudinali a contatto con la matrice hanno ottenuto un valore medio di 1904 MPa, mentre quelli con le fibre trasversali a contatto con la matrice hanno ottenuto il valore di 1378 MPa, il 28% inferiore. Come detto in precedenza, la risposta carico-spostamento per provini monostrato con fibre trasversali orientate verso l'interno, mostrata in Fig. 7d, evidenzia carichi di picco inferiori, così come la rigidità, rispetto ad un opposto orientamento delle fibre, come mostrato in Fig. 7a e b. la risposta è diversa poiché il trasferimento delle tensioni avviene principalmente tra matrice e fibre longitudinali. Quando vengono interposte le fibre trasversali contro lo strato interno della matrice, si interrompe la continuità del legame con i fasci longitudinali.

Il valore medio di  $\sigma^*$  per tutti i provini a doppio strato di lunghezza 330 mm è risultato di 2022 MPa. Quelli privi di strato esterno, con i fasci longitudinali orientati verso lo strato interno, presentano una riduzione di  $\sigma^*$  del 6 %. Questa lieve riduzione può essere dovuta ad una riduzione della superficie di aderenza tra fibra e matrice, mancando lo strato esterno. Cosa più importante, osservando il valore della riduzione, è che il meccanismo di trasferimento delle tensioni non è uguale per entrambe le superfici. Questi risultati combinati suggeriscono che il trasferimento del taglio interfacciale è molto complesso per i compositi FRCM e si rende necessario un ulteriore studio per comprendere meglio l'importanza dei diversi parametri delle superfici. Gli autori stanno attualmente sviluppando uno studio improntato sull'approccio della meccanica della frattura per indagare il ruolo dello strato esterno della matrice.

## LAVORI FUTURI

Modelli che rappresentino il comportamento interfacciale tra matrice e fibra sono necessari per determinare con accuratezza la capacità di carico dei composti FRCM per applicazioni di rinforzo strutturale. E' necessaria una ulteriore ricerca per capire se la modalità di prova influenza i risultati. Inoltre sarebbe opportuno testare campioni con lunghezze di incollaggio superiori. Ulteriori analisi della distribuzione delle deformazioni aiuteranno a determinare se un approccio della meccanica della frattura, simile a quello usato per l'interfaccia FRP-calcestruzzo, può essere impiegato per descrivere il meccanismo di trasferimento delle tensioni nell'interfaccia matrice-fibra. Se si può utilizzare una legge di materiale coesivo, sarà importante indagare il ruolo di una maglia discreta di fasci ed il diverso spessore della matrice tra composti FRP ed FRCM. Infine, i test descritti in questo studio sono stati condotti ad una velocità di spostamento contenuta. Dei test aggiuntivi con velocità maggiori o cicli di carico sarebbero opportuni per esaminare la sensibilità dell'interfaccia FRCM-calcestruzzo a diverse condizioni di carico.

## CONCLUSIONI

Questo documento descrive i risultati di una ricerca sperimentale condotta per studiare il comportamento ed il meccanismo di trasmissione delle tensioni di composti FRCM applicati esternamente ad un substrato di calcestruzzo. Sono stati effettuati test di trazione monoassiale su campioni di rete in fibra, con diverse larghezze. Sono state condotte prove di taglio diretto su provini con strisce di composito incollate a blocchi di calcestruzzo. I parametri variabili sono stati la lunghezza e la larghezza di incollaggio. In base ai risultati di questo studio, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- il distacco avviene all'interfaccia fibra-matrice invece che all'interfaccia matrice-calcestruzzo;
- la distribuzione assiale delle deformazioni lungo la lunghezza di incollaggio è simile a quella tipica dei composti FRP applicati su calcestruzzo, ed indica che la lunghezza efficace di incollaggio è compresa tra 250 e 330 mm. La deformazione massima corrispondente al massimo carico è in media di 9800  $\mu\epsilon$ , approssimativamente il 68 % della deformazione massima della rete in fibra;

- a differenza dei legami FRP-calcestruzzo, non si osservano effetti dovuti alla larghezza nei composti FRCM su calcestruzzo. Questo potrebbe essere dovuto ad un'azione indipendente dei fasci longitudinali;
- il valore medio della tensione massima per provini senza lo strato esterno della matrice, con le fibre longitudinali a contatto con lo strato interno, è risultato il 6 % inferiore rispetto a quello di provini della stessa lunghezza con entrambi gli strati. Questo risultato indica che il trasferimento delle tensioni dai due lati della rete in fibre non è uguale.

### **3.2 Experimental analysis of the bond behavior of glass, carbon and steel FRCM composites. [7]**

*T. D'Antino, C. Pellegrino, C. Carloni, L. H. Sneed, G. Giacomini – 2014*

#### **PREMESSA**

Negli ultimi decenni, nel settore delle costruzioni si è assistito ad una rapida crescita dell'interesse verso il potenziamento e l'adeguamento delle opere in calcestruzzo armato (RC) e in muratura esistenti. I composti a matrice polimerica fibrorinforzati (FRP) hanno guadagnato una grande popolarità e sono disponibili diversi studi circa il loro utilizzo in applicazioni di rinforzo e retrofit. Nuovi promettenti sviluppi sui materiali compositi sono rappresentati da cosiddetti materiali compositi fibrorinforzati a matrice cementizia (FRCM). Gli FRCM sono composti da fibre ad alta resistenza incorporate in una matrice inorganica cementizia che è responsabile per il trasferimento delle sollecitazioni tra la struttura esistente e il materiale resistente. I materiali compositi FRCM sono ancora agli inizi e la letteratura relativa al rinforzo e agli utilizzi su muratura è ancora molto limitata.

Questo studio rappresenta una campagna sperimentale condotta su diversi tipi di composito FRCM con vetro, carbonio e acciaio annegati in due diversi tipi di matrice cementizia e applicati su prismi di calcestruzzo di diverse dimensioni. Il metodo di prova a taglio diretto è stato usato per studiare il meccanismo di trasferimento di tensione tra il composito FRCM ed il substrato di calcestruzzo. Sono state testate due diverse lunghezze di incollaggio. La rottura è avvenuta all'interfaccia matrice-fibra per alcuni campioni, mentre per altri si è verificata all'interfaccia matrice-calcestruzzo. Questo lavoro contribuisce allo studio del comportamento dell'aderenza negli FRCM, il quale rappresenta un elemento fondamentale per l'efficacia del rinforzo con tali compositi.

## INTRODUZIONE

La crescente necessità di rafforzare, ripristinare ed adeguare simicamente strutture esistenti in calcestruzzo armato (RC) e strutture murarie, ha spinto l'ingegneria civile e l'industria delle costruzioni a sviluppare nuovi materiali innovativi. I materiali polimerici fibrorinforzati (FRP) rappresentano una risposta significativa a questa esigenza. Essi sono costituiti da fibre ad alta resistenza (ad esempio carbonio, vetro o fibra aramidica) e una resina termoindurente (organica), tipicamente epossidica, usata come matrice. Sebbene i compositi FRP siano stati ampiamente studiati sia per il calcestruzzo armato che per le applicazioni in muratura, alcune questioni sono ancora irrisolte. Ad esempio, l'FRP si degrada se sottoposto a temperature prossime o superiori alla temperatura di transizione vetrosa della matrice, e si degradano progressivamente se esposti alla radiazione UV. Inoltre non presentano permeabilità al vapore, questione importante specialmente per applicazioni su muratura. Per superare questi problemi, le matrici organiche possono essere sostituite dalle matrici inorganiche di più recente sviluppo. Sebbene in letteratura siano stati dati nomi diversi, basati sulla matrice e fibre impiegate, i materiali compositi costituiti da fibre ad alta resistenza immerse in una matrice cementizia sono solitamente denominati materiali compositi fibrorinforzati a matrice cementizia (FRCM).

Negli ultimi decenni gli FRP sono stati ampiamente studiati e sono state pubblicate alcune linee guida per aumentarne le applicazioni. La letteratura per quanto riguarda gli FRCM è molto limitata e non sono ancora disponibili degli studi completi sul meccanismo di trasferimento delle tensioni tipico degli FRCM. Il limitato materiale disponibile in letteratura scientifica in materia di compositi FRCM riporta che il punto critico di questa tecnologia è localizzabile all'interfaccia matrice-fibra piuttosto che all'interno del substrato o all'interfaccia matrice-calcestruzzo, come tipicamente osservato con materiali compositi FRP. Il cedimento nei legami FRCM-calcestruzzo è causato da una progressiva delaminazione della fibra dalla matrice, caratterizzata da grandi scorrimenti all'interfaccia matrice-fibra. Inoltre, il processo di delaminazione è complicata dal cosiddetto comportamento telescopico, un meccanismo che porta ad un comportamento differenziale delle fibre all'interno del fascio, principalmente a causa della diversa impregnazione nella matrice da parte dei filamenti esterni rispetto ai filamenti interni. In base alle prove riportate in letteratura, poiché il distacco che avviene all'interno del composto, le proprietà meccaniche del substrato potrebbero essere meno rilevanti rispetto a quelle nelle applicazioni FRP, mentre la matrice e di conseguenza l'adesione matrice-fibra svolgeranno il ruolo fondamentale. Per questo motivo, i risultati sperimentali degli accoppiamenti FRCM-calcestruzzo dovrebbero essere simili ai risultati degli accoppiamenti FRCM muratura, a condizione che la criticità dell'FRCM nelle applicazioni su muratura sia ancora una volta localizzata

all'interfaccia matrice-fibra.

In questo documento sono presentati e discussi i risultati di una campagna sperimentale condotta su unioni FRCM-calcestruzzo. I compositi FRCM analizzati erano costituiti da diverse combinazioni di matrici cementizie modificate con polimeri e fibre ad alta resistenza formate da carbonio e fibre di vetro. Inoltre è proposto un confronto con i risultati dei compositi FRCM con fibre in acciaio, destinati ad essere applicati solo su substrato di calcestruzzo. Sono state effettuate ventiquattro prove di taglio diretto su provini FRCM-calcestruzzo con lo stesso materiale composito applicato in ugual larghezza e due lunghezze di incollaggio diverse. Questa ricerca contribuisce alla comprensione del complesso meccanismo di trasferimento delle tensioni fra composito FRCM ed il substrato, che è di fondamentale importanza per l'efficacia dei rinforzi con FRCM.

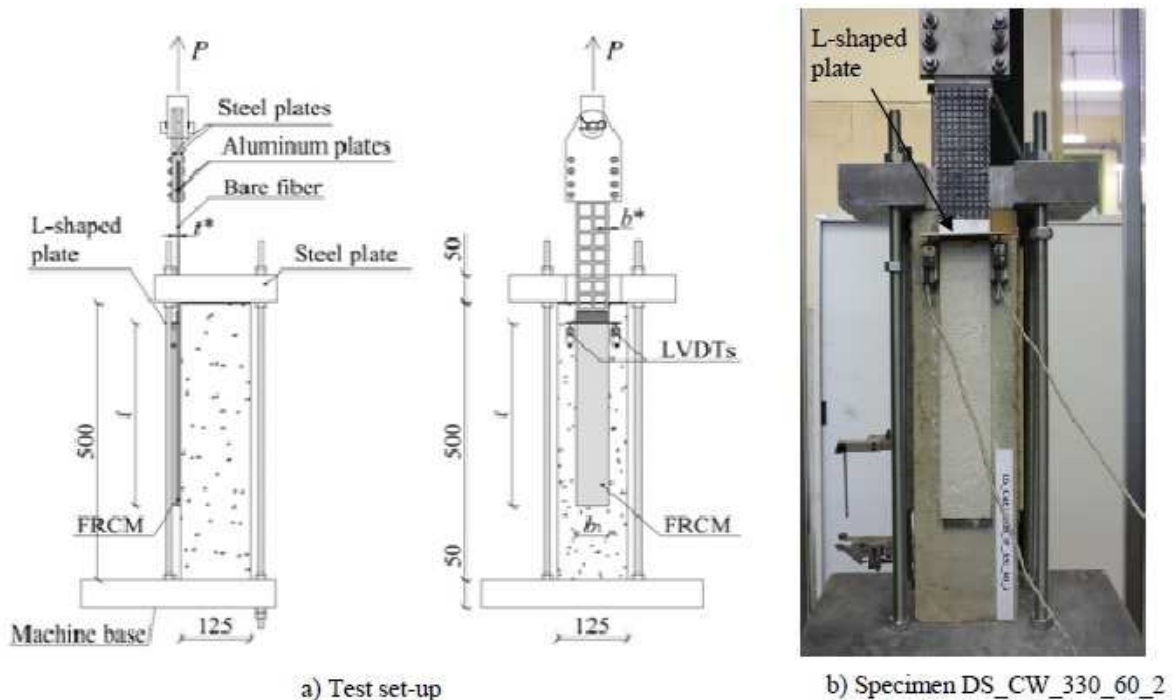


Figure 1. a) Single-lap direct-shear test set-up. b) Photo of specimen DS\_CW\_330\_60\_2.

## SETUP DELLE PROVE

Il materiale composito FRCM è stato applicato sulla superficie di un blocco di calcestruzzo (prisma) avente base 125 x 125 mm ed altezza 500 mm. L'applicazione è stata effettuata su una delle tre facce del prisma gettate contro il cassero, e la superficie non è stata trattata prima dell'applicazione. La fascia di composito ha una larghezza  $b_1$  pari a 60 mm e una lunghezza  $\ell$  pari a 330 o 450 mm. È stata adottata la configurazione push-pull in cui le fibre sono state tirate mentre il prisma di calcestruzzo è stato trattenuto. La matrice è stata applicata al prisma di calcestruzzo alla distanza di 30 mm dal bordo superiore. Le fibre sono state incorporate nella matrice per una lunghezza pari ad  $\ell$  e sono state lasciate a vista al di fuori della lunghezza di applicazione del composito. Due piastre di alluminio di larghezza  $b_1$  e lunghezza 60 mm sono state applicate al termine delle fibre a vista utilizzando una resina epossidica termoindurente per migliorare la presa della macchina di prova. Sono state utilizzate due piastre di acciaio collegate alla testa della macchina per bloccare le piastrine di alluminio. Le piastre di acciaio sono state serrate reciprocamente mediante otto bulloni passanti, e collegate alla macchina mediante un giunto a cerniera (Fig. 1).

Le prove sono state condotte in controllo della corsa ad una velocità 0.005 mm/s. Due LVDT sono stati montati sul prisma di calcestruzzo vicino all'estremità caricata del composito per misurare lo spostamento delle fibre rispetto al supporto. Gli LVDT reagiscono contro una piastra angolare in alluminio incollato alle fibre a vista appena al di fuori del composito (Fig. 1). In questo documento lo spostamento medio dei due LVDT è denominato spostamento globale "g", mentre il carico applicato è chiamato P.

## PROPRIETA' DEI MATERIALI

I prismi sono stati confezionati con calcestruzzo a base di cemento Portland (Tipo 1) senza additivi. Dallo stesso getto di calcestruzzo sono stati ricavati sei cubi da 150 mm per determinare la resistenza media a compressione secondo la norma UNI EN 12390-3. La resistenza cubica media è  $R_{cm} = 59,3$  MPa (CoV = 0.150). Sono state utilizzate due matrici con diverse caratteristiche di resistenza meccanica ed aderenza. Dallo stesso getto usato per preparare i provini, sono stati confezionati tre prismi di dimensioni 40x40x160 mm per ogni matrice usata, e sono stati testati secondo la norma UNI EN 1015-11. La resistenza media alla compressione  $r_{cm}$  e la resistenza media alla flessione  $f_{flex,m}$  per ogni tipo di matrice, sono riportate nella Tabella 1.



Table 1. Mechanical properties of the matrices employed.

Matrix	$r_{cm}$ [MPa] (CoV)	$f_{flex,m}$ [MPa] (CoV)
W	47.6 (0.040)	6.4 (0.009)
S	35.5 (0.011)	6.1 (0.077)

Sono stati impiegati tre diversi tipi di fibre: vetro, carbonio e acciaio. Le fibre di carbonio e le fibre di vetro erano disposte in direzione longitudinale e trasversale in forma di rete. Le fibre di acciaio erano costituite solamente da 5 fasci di filamenti longitudinali con superficie nominale pari a 24 mm<sup>2</sup>/m. Ogni tipo di fibra è stato testato a trazione per determinare la resistenza  $\sigma^* = P^* / (nb^*t^*)$ , dove  $P^*$  è il carico di picco applicato misurato durante la prova,  $n$  è il numero di fasci di fibre longitudinali all'interno del composito,  $b^*$  è la larghezza del fascio e  $t^*$  è lo spessore di un unico fascio. Sono stati testati almeno due campioni con la stessa larghezza. Le prove di trazione sono state condotte in controllo di spostamento ad una velocità di 2 mm/min seguendo le prescrizioni della norma ASTM D3039, sui provini con lunghezza di 500 mm e varie larghezze  $b_2$ . Due piastrine di alluminio sono state incollate alle estremità dei campioni utilizzando una resina epossidica termoindurente per migliorare la presa della macchina.

Table 2. Geometrical and mechanical properties of the fibers employed.

Fiber	$b^*$ [mm]	$t^*$ [mm]	$b_2$ [mm] ( $n$ )	$\bar{\sigma}^*$ [MPa] (CoV)
C	3.5	0.05	4(1), 20(3), 40(5), 60(8)	4330 (0.083)
S	-	-	60(33)	3700 (0.054)
G221	4.0	0.05	5(1), 20(3), 60(5)	1300 (0.142)

La tabella 2 riporta le caratteristiche geometriche dei campioni ed i risultati in termini di resistenza alla trazione media  $\sigma^*$  per i provini con lo stesso tipo di fibra. Nella Tabella 2, C = carbonio, S = acciaio e G221 = vetro con densità  $\rho = 220$  g/m<sup>3</sup>.

## RISULTATI DELLA SPERIMENTAZIONE

Vengono presentati i risultati sperimentali di 24 prove di taglio diretto condotte sugli accoppiamenti FRCM-calcestruzzo costituiti da diverse matrici e fibre. I campioni testati sono stati nominati in seguito con la notazione DS\_FM\_X\_Y\_Z, dove F = fibra impiegata (C = carbonio, S =

acciaio, e G221 = vetro con densità per unità di spessore  $\rho = 220 \text{ g/m}^2$ , M = matrice impiegata (vedi Tabella 1), X = lunghezza di applicazione ( $\ell$ ) in mm, Y = larghezza di incollaggio ( $b_1$ ) in mm, e Z = numero del provino. Il carico massimo  $P^*$  e la tensione di picco corrispondente  $\sigma^*$  (definita in precedenza) sono riportati nella Tabella 3 per ciascun campione testato.

Table 3. Peak load and corresponding peak stress of the single-lap direct shear tests.

Specimen name	$P^*$ [kN]	$\sigma^*$ [MPa]	Specimen name	$P^*$ [kN]	$\sigma^*$ [MPa]
DS_CW_330_60_1	4770	3400	DS_G221S_330_60_1	-	-
DS_CW_330_60_2	3600	2570	DS_G221S_330_60_2	1350	1410
DS_CW_330_60_3	4260	3040	DS_G221S_330_60_3	1560	1630
DS_CW_450_60_1	3820	2730	DS_G221S_450_60_1	-	-
DS_CW_450_60_2	-	-	DS_G221S_450_60_2	1430	1490
DS_CW_450_60_3	-	-	DS_G221S_450_60_3	-	-
DS_CS_330_60_1	4260	3040	DS_SW_330_60_1	9920	6890
DS_CS_330_60_2	4510	3220	DS_SW_330_60_2	5840	4060
DS_CS_330_60_3	4900	3500	DS_SW_330_60_3	3920	2730
DS_CS_450_60_1	5820	4160	DS_SW_450_60_1	7270	5050
DS_CS_450_60_2	5720	4080	DS_SW_450_60_2	4500	3120
DS_CS_450_60_3	5510	3940	DS_SW_450_60_3	6270	4350

I campioni DS\_CW\_450\_60\_2 e DS\_CW\_450\_60\_3, composti da fibre di carbonio e matrice cementizia W, non hanno dato risultati a causa della rottura prematura di uno dei fasci di fibre sul bordo immediatamente all'esterno delle piastre di alluminio utilizzate per ancorare il campione. Queste rotture hanno suggerito una non uniforme distribuzione del carico tra i diversi fasci, che ha portato uno di questi a strapparsi prima degli altri. Per i restanti campioni FRCM in carbonio, con matrice W o S, le fibre a vista esterne alla zona di incollaggio sono state impregnate con una resina epossidica termoindurente per favorire una distribuzione più uniforme del carico applicato e per evitare rotture premature. Le risposte carico-spostamento globale dei campioni FRCM in carbonio con matrice S sono riportate in Fig. 3a. La rottura osservata è stata caratterizzata dal distacco della fibra dalla matrice. Questo comportamento è simile a quello osservato con i compositi PBO-FRCM osservati dagli autori. Dopo un ramo lineare iniziale, partendo dal presupposto che esista una lunghezza efficace di incollaggio e che sia inferiore alla lunghezza di applicazione del composito testato, la risposta carico applicato-spostamento globale dei compositi FRCM con il carbonio diventa non lineare fino all'inizio dello scorrimento della fibra nella matrice (Fig. 3a). Dopo di che, il carico applicato aumenta per la presenza di attrito tra fibre e matrice e tra i filamenti di fibre della porzione della lunghezza di aderenza che è già delaminata. Quando il carico applicato raggiunge il carico massimo  $P^*$ , il meccanismo di legame è ancora completamente stabile e l'attrito fornisce il suo contributo sulla porzione della superficie incollata dove si è verificato il distacco. Quando il

meccanismo di aderenza non è più stabile il carico applicato diminuisce a un valore costante che corrisponde al contributo di attrito. Confrontando i risultati dei campioni con differenti lunghezze di ancoraggio si può osservare che il carico massimo è maggiore nel caso di una lunghezza di aderenza superiore. Supponendo che la lunghezza di ancoraggio del composito testato sia più lunga della lunghezza di incollaggio efficace, il fatto che il carico massimo sia maggiore per i campioni con una lunghezza di ancoraggio superiore (Fig. 3a) è attribuito al maggiore apporto di attrito, mentre il carico di delaminazione rimane costante. Gli autori stanno effettuando ulteriori test per confermare questo comportamento e determinare la lunghezza efficace di incollaggio. I valori di carico applicato-spostamento globale dei campioni FRCM con carbonio e matrice W sono riportati in Fig. 3b. Le risposte di carico dei provini DS\_CW\_330\_60\_2, DS\_CW\_330\_60\_3 e DS\_CW\_450\_60\_1 sono simili al comportamento dei campioni FRCM con carbonio a matrice S, presentando una rottura imputabile allo scorrimento delle fibre nella matrice cementizia (Fig. 4a). Il campione DS\_CW\_330\_60\_1 è giunto a rottura per stiramento della fibra dalla parte caricata della matrice (Fig. 4b). I valori massimi di carico dei campioni FRCM con carbonio e matrice S sono generalmente superiori a quelli dei campioni FRCM con carbonio e matrice W (Fig. 3), il che suggerisce un comportamento del legame di interfaccia fibra-matrice S migliore.

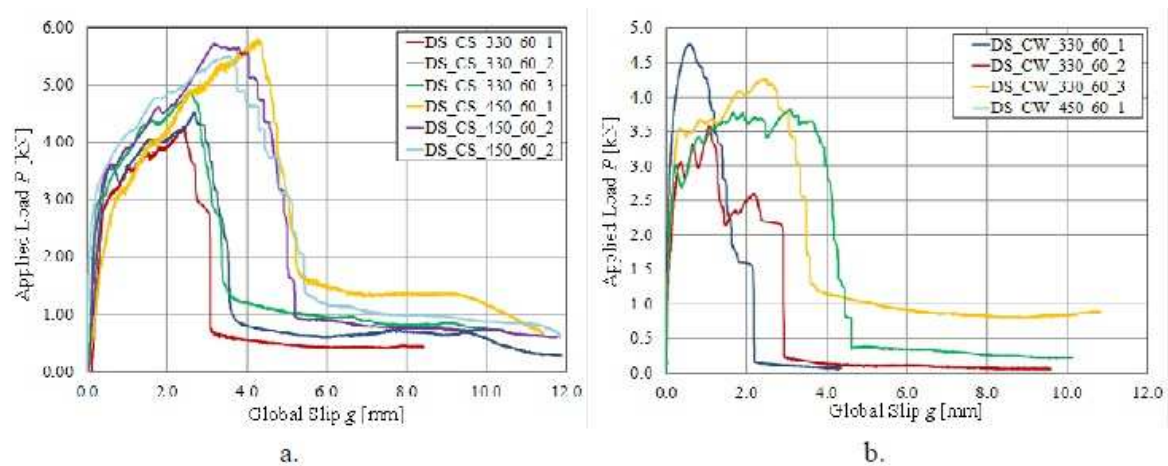


Figure 2. Applied load vs. global slip responses for carbon FRCM specimens with (a) matrix S and (b) matrix W.



Figure 3. a) Slip of the fibers in specimen DS\_CW\_330\_60\_3. b) Stretching of the fibers at the cementitious matrix-epoxy interface in specimen DS\_CW\_330\_60\_1.

Per tutti i campioni FRCM con vetro, le fibre libere al di fuori della zona di applicazione del composito sono state impregnate con una matrice epossidica per favorire una distribuzione uniforme del carico ad eccezione dei campioni DS\_G221S\_330\_60\_1 e DS\_G221S\_450\_60\_1, in cui effettivamente si è arrivati alla rottura delle fibre esterne a causa della distribuzione non uniforme del carico applicato. Le risposte di carico dei campioni DS\_G221S\_330\_60\_2, DS\_G221S\_330\_60\_3, e DS\_G221S\_450\_60\_2 sono riportati in Fig. 4a. Fatta eccezione per il campione DS\_G221S\_450\_60\_3, che non ha dato buoni risultati già ad un livello di carico molto basso a causa del danneggiamento delle fibre durante il confezionamento dei provini, i rimanenti campioni con fibre di vetro hanno manifestato la rottura della fibra dentro l'area incollata della matrice cementizia (Fig. 4b). La modalità di rottura è stata simile a quella osservata per i campioni FRCM con carbonio ed è stata caratterizzata dallo scorrimento delle fibre all'interno della matrice cementizia. La Fig. 4a mostra che il carico applicato aumenta linearmente fino alla comparsa di microlesioni all'interfaccia matrice-fibra. Dopodiché la risposta in termini di carico diventa non lineare e raggiunge il massimo carico  $P^*$ , valore prossimo alla resistenza a trazione della fibra.

Osservando l'andamento del carico (fig. 4a), non è chiaro se il carico di distacco, che corrisponde alla delaminazione della fibra dalla matrice, sia stato raggiunto o le fibre abbiano ceduto prima che il meccanismo di trasferimento della tensione si sia completamente stabilito. La rottura della fibra è caratterizzata dal cosiddetto comportamento telescopico che, a causa della diversa impregnazione dei filamenti di fibra nel nucleo rispetto ai filamenti esterni, porta alcuni filamenti a rompersi prima degli altri.

Dopo  $P^*$ , il carico applicato diminuisce con l'aumentare dello scorrimento globale, fino a quando tutti i filamenti dei fasci di fibre si rompono. A rottura avvenuta, l'attrito tra le fibre

delaminate e la matrice circostante è la causa del carico residuo (Fig. 4a), che diminuisce con l'aumentare dello spostamento globale e la conseguente riduzione dell'area di contatto tra fibre e matrice.

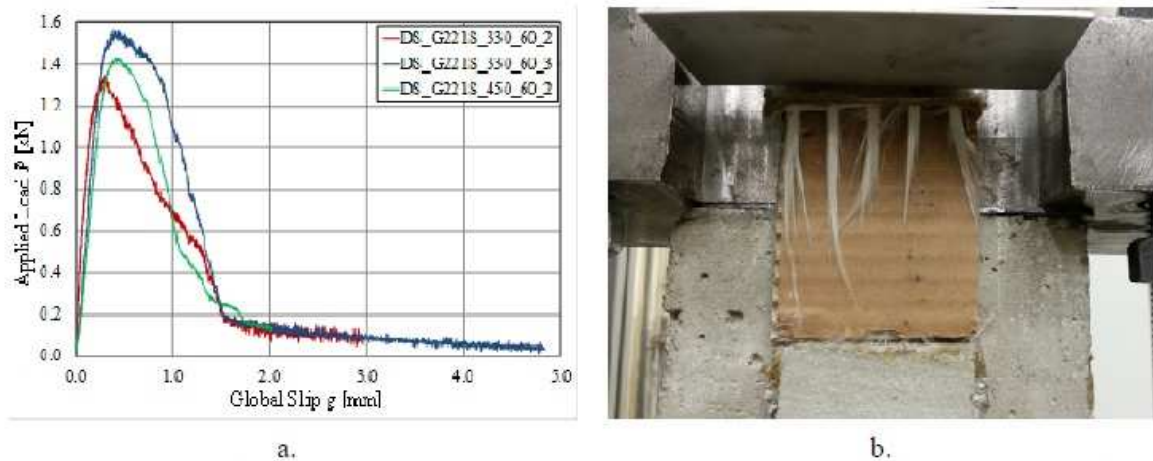


Figure 4. a) Applied load vs. global slip responses for specimens with glass fibers. b) Failure of the glass fibers at the cementitious matrix-epoxy interface.

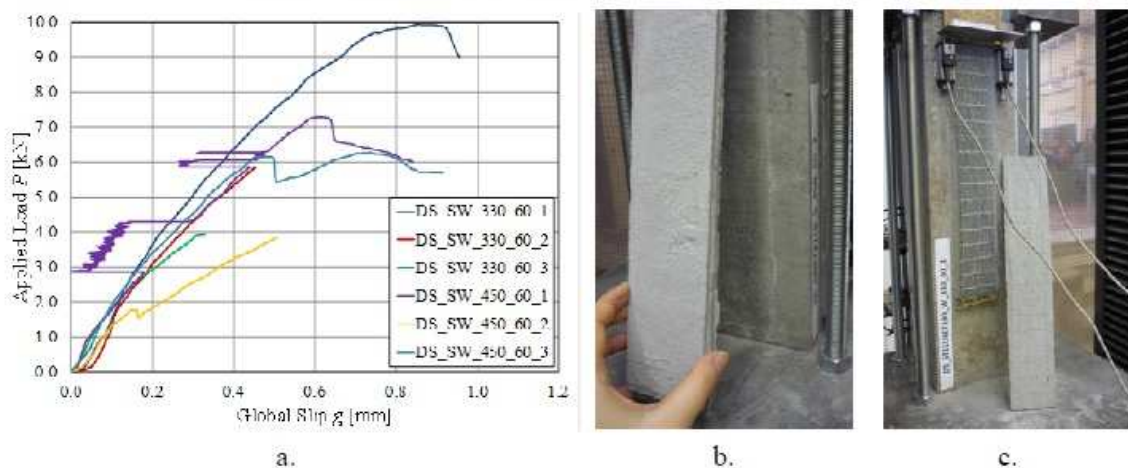


Figure 5. a) Applied load vs. global slip responses for steel FRCM specimens. b) Detachment of the steel FRCM composite in specimen DS\_SW\_450\_60\_2. c) Splitting failure of specimen DS\_SW\_330\_60\_1.

Le risposte carico-spostamento dei compositi FRCM con acciaio sono riportati in Fig. 5a. Va notato che gli sbalzi improvvisi dello spostamento, misurati per il campione DS\_SW\_450\_60\_1 erano causata da problemi con il sistema di acquisizione dati durante il test. I campioni con fibre in acciaio e matrice cementizia hanno mostrato una rottura fragile caratterizzata dalla delaminazione di tutto il composito dal substrato in calcestruzzo (Fig. 5b) ad eccezione del campione DS\_SW\_330\_60\_1, che ha mostrato una rottura dovuta alla separazione dei due strati della matrice (Fig. 5c). Va notato che il distacco è avvenuto all'interfaccia composito-substrato e non all'interno di

un sottile strato di calcestruzzo, come accade normalmente nelle giunzioni FRP-calcestruzzo. La rottura per scissione dello strato esterno della matrice, che è stato anche osservato con lo stesso composito e un test di set-up diverso, è dovuta alla elevata densità dei fasci di fibra di acciaio che ha impedito allo strato di matrice esterna di penetrare completamente attraverso la rete e legare con lo strato interno.

## CONCLUSIONI

Questo documento presenta i risultati sperimentali di 24 prove di taglio diretto singolo effettuate su compositi FRCM comprendenti fibre di carbonio, acciaio e vetro, applicati ad un substrato di calcestruzzo con due differenti matrici cementizie. Le risposte di carico e le modalità di rottura osservate sono state diverse per ogni materiale composito considerato. Il composito FRCM con carbonio e matrice S è giunto a rottura a causa della delaminazione della fibra dalla matrice come già è stato osservato dagli autori con diverso composito FRCM. La delaminazione è stata caratterizzata da un aumento dello scorrimento delle fibre e dall'attrito tra fibre-matrice e tra i filamenti di fibra. Il composito FRCM con carbonio a matrice W, con le fibre a vista impregnate con resina epossidica, si è rotto in un caso per lo stiramento delle fibre immediatamente al di fuori della matrice cementizia, mentre gli altri tre esemplari hanno manifestato una delaminazione delle fibre dalla matrice. I carichi di picco ottenuti sono stati in genere superiori con la matrice S che con la matrice W, indicando un comportamento migliore nel legame di interfaccia fibra-matrice S. Il composito FRCM con vetro ha mostrato un comportamento simile a quello dei compositi FRCM con carbonio ma ha presentato la rottura delle fibre all'interno della zona cementizia incollata. I valori di massimo carico ottenuti erano vicini alla resistenza ultima della fibra e sono stati caratterizzati dalla progressiva rottura di filamenti di fibra e dal diverso comportamento di legame dei filamenti (comportamento telescopico). Il composito FRCM con acciaio si è rotto in un caso per la scissione della matrice e per i restanti cinque campioni è avvenuto il distacco dell'intero composito dal supporto in calcestruzzo. L'alta densità della rete in fibra di acciaio ha impedito allo strato di matrice esterna di penetrare completamente attraverso la rete in fibra e di legare con lo strato di matrice interna; ciò ha portato alla rottura per sezionamento della matrice.

Dal momento che le modalità di collasso osservate su compositi FRCM con vetro e carbonio hanno coinvolto solo l'interfaccia matrice-fibra, i risultati ottenuti dovrebbero essere validi sia per supporti in calcestruzzo che in muratura, a condizione che il punto debole degli accoppiamenti FRCM-muratura sia all'interfaccia matrice-fibra.

## 4. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI UTILIZZATI

Al fine di poter interpretare i risultati ottenuti dalle prove sperimentali, si è proceduto con l'effettuare una serie di prove preliminari atte a definire le caratteristiche meccaniche dei singoli materiali utilizzati.

La Tab. 4.1 riporta, per ogni materiale utilizzato, la tipologia di prova con relativa normativa di riferimento e le caratteristiche dei provini testati in questa sperimentazione.

MATERIALE	TIPO DI PROVA	PROVINI
Malta Concrete Rock S	Prova a compressione e flessione (UNI EN 1015-11)	n.20 provini dimensione 160x40x40 mm L = 160 mm
Carbonio C-NET 170 BL	Prova a trazione su fibra secca (ASTM 3039)	n.6 provini L = 500 mm
Vetro G-NET 251 BA	Prova a trazione su fibra secca (ASTM 3039)	n.5 provini L = 500 mm

Tab. 4.1 – Materiali testati e normativa di riferimento. [2][3][5]

### 4.1 PROVA DI COMPRESSIONE SU CALCESTRUZZO

I prismi di calcestruzzo usati come substrato per l'applicazione dei compositi FRCM, sono gli stessi utilizzati in una sperimentazione precedente. Vengono riportati i valori relativi alle prove effettuate in tal sede [9].

Il calcestruzzo utilizzato per la sperimentazione è un calcestruzzo tradizionale predosato per impiego strutturale ed è stato caratterizzato in laboratorio con prove di rottura a compressione su provini cubici confezionati e stagionati a 28 giorni di maturazione.

I provini in esame sono stati contrassegnati dalla nomenclatura CLS-An o CLS-Bn dove:

- CLS: materiale del campione – calcestruzzo;
- A: quantitativo d'acqua d'impasto pari a 1.6 litri a sacco;
- B: quantitativo d'acqua d'impasto pari a 1.4 litri a sacco;
- n: numero del campione.

La prova di compressione viene eseguita mediante una macchina universale elettromeccanica Galdabini (Fig. 4.1). Il campione è posizionato senza alcuna interposizione di materiale deformabile fra le facce del provino e i piatti della macchina, e viene sottoposto ad una sollecitazione assiale di compressione con velocità di carico pari a 0.4 MPa/s.



Fig. 4.1 – Macchina universale elettromeccanica Galdabini. [9]

Il tipo di rottura dal campione è indice della resistenza del calcestruzzo. Se il cubetto si rompe determinando una serie di piramidi più o meno regolari, con le facce che formano un angolo di circa  $45^\circ$  con la base, allora il calcestruzzo ha raggiunto senz'altro un'elevata resistenza a compressione. I calcestruzzi scadenti tendono invece a sgretolarsi senza precisi piani di rottura.

La formazione delle “piramidi di rottura”, con le facce a  $45^\circ$ , è conseguenza degli sforzi tangenziali, che hanno origine dalla compressione. Tali sforzi raggiungono il loro massimo valore in corrispondenza dei piani inclinati a  $45^\circ$  ed è a causa di tali sforzi di scorrimento che si verifica la rottura del cubetto (Figg. 4.2 e 4.3).

I risultati sono illustrati in fig. 4.2, dove  $a$ ,  $b$ ,  $h$  = dimensione del provino,  $se_z$  = area della sezione del provino,  $F_u$  = carico di rottura a compressione,  $R_{ck}$  = resistenza cubica a compressione.

Dall'analisi dei risultati si nota che i provini contenenti un maggior quantitativo d'acqua (CLS-A) raggiungono dei valori di resistenza a compressione più bassi rispetto ai provini con un minor quantitativo d'acqua (CLS-B). In tutti i casi, i valori ottenuti dalle prove effettuate soddisfano ampiamente le caratteristiche minime dichiarate dal produttore.



Campione	Data di getto	Data di prova	a [mm]	b [mm]	h [mm]	sez. [mm <sup>2</sup> ]	Peso [Kg]	F <sub>u</sub> [Kg <sub>f</sub> ]	R <sub>ck</sub> [MPa]
CLS - A1	12/06/13	10/07/13	150	149	150	22350	7,97	117500	51,6
CLS - A2	12/06/13	10/07/13	150	152	150	22800	8,11	127000	54,6
CLS - A3	12/06/13	10/07/13	150	150	150	22500	8,09	127000	55,4
resistenza cubica media a compressione a 28 giorni:								misurata	53,9
								dichiarata	30,0
deviazione standard:									1,6
CLS - B1	12/06/13	10/07/13	150	150	150	22500	8,04	148000	64,5
CLS - B2	12/06/13	10/07/13	150	150	150	22500	8,21	153000	66,7
CLS - B3	12/06/13	10/07/13	150	151	150	22650	8,20	146000	63,2
resistenza cubica media a compressione a 28 giorni:								misurata	64,8
								dichiarata	30,0
deviazione standard:									1,4

Tab. 4.2 – Risultati della prova a compressione su calcestruzzo. [9]

## 4.2 PROVE DI CARATTERIZZAZIONE SU MALTA

Il riferimento normativo per le prove sulla malta utilizzata come matrice del composito, è costituito dalla UNI EN 1015-11 “Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita” [2] e UNI EN 12190 “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Metodi di prova: Determinazione della resistenza a compressione delle malte da riparazione” [3]. I provini confezionati hanno forma prismatica di dimensione 160x40x40 mm, come prescrive la norma. Ogni campagna di prove di flessione e compressione è stata condotta su almeno tre provini, da cui sono stati ricavati i valori medi di resistenza.

La prova di flessione (Fig. 4.2) prevede l’utilizzo di una macchina di prova che vincola il provino alle estremità attraverso dei ritegni a rullo distanti 10 cm. Centralmente un terzo rullo imprime un carico progressivamente crescente a velocità costante. Tale configurazione impone che nel mezzo del provino si generi un momento flettente crescente fino al raggiungimento del valore di rottura indicato dal cursore mobile sulla barra graduata della macchina. Importante è il posizionamento del provino, in quanto solo le facce gettate contro l’acciaio del cassero devono venire a contatto con i tre rulli di acciaio.

Avvenuta la rottura per flessione, vengono utilizzati i due spezzoni di provino per il test di compressione (Fig. 4.3). La prova viene eseguita con l’utilizzo di una pressa a controllo idraulico. Si interpone il provino, con le facce piane, tra i piatti della macchina. Le piastre che attuano la forza al provino di malta hanno un’impronta di 40x40 mm, in questo modo si agisce su un volume controllato e sempre costante di materiale.



Fig. 4.2 – Macchina di prova a flessione su malta. [9]

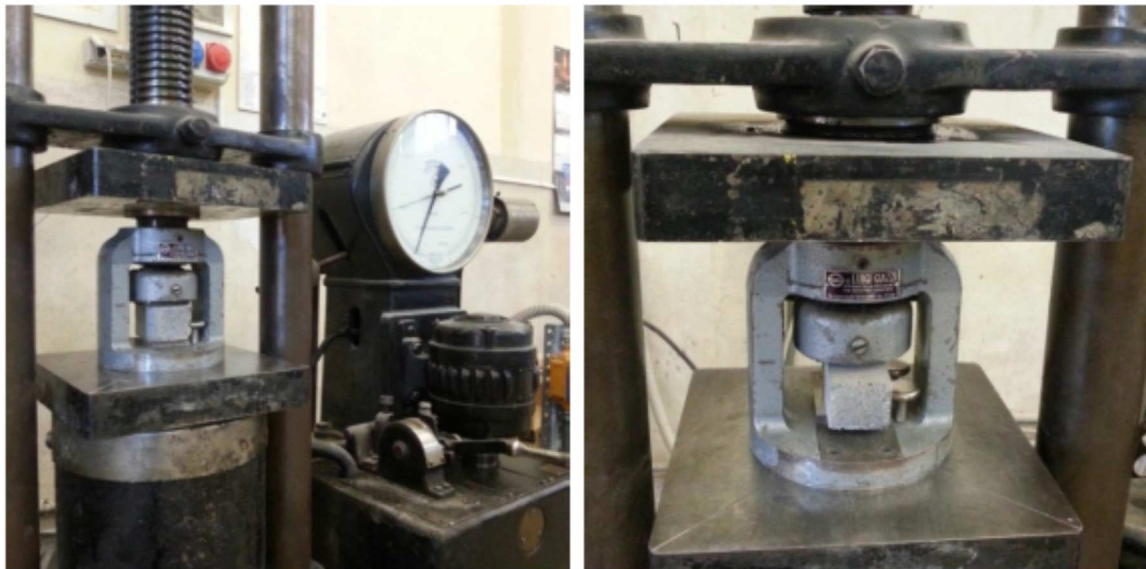


Fig. 4.3 – Macchina di prova a compressione su malta. [9]

La sperimentazione condotta è stata suddivisa in tre campagne di prove, di cui la prima dedicata ai compositi rinforzati con fibra di carbonio, la seconda relativa ai compositi rinforzati con fibra di vetro, la terza riguardante provini dotati di strain gauges ed il recupero di alcuni campioni risultati inefficaci nei test precedenti. Per ogni campagna, in concomitanza con il confezionamento della malta costituente la matrice dei compositi, sono stati preparati i campioni dedicati ai test di caratterizzazione della sola malta.

#### 4.2.1 CARATTERIZZAZIONE “CONCRETE ROCK S” DELLA PRIMA CAMPAGNA DI PROVE

Concrete Rock S (Allegato 1) è una malta monocomponente tixotropica premiscelata a base di leganti inorganici, a reattività pozzolanica con leganti polimerici, fibrorinforzata e a ritiro compensato.

È un prodotto ideato per il ripristino strutturale in condizioni in cui le murature possano essere soggette all’attacco da parte di agenti aggressivi. Viene confezionata in sacchi da 25 kg, già pronta alla miscelazione con sola acqua (19% in peso della polvere) per ottenere un impasto tixotropico non segregabile e a ritiro compensato.



Fig. 4.4 – Cassero per il confezionamento di tre provini in malta, dimensioni 40x40x160 mm.

I provini vengono definiti attraverso una sigla composta dal nome della malta e dal numero sequenziale, “Rock\_S\_n”, dove:

- Rock\_S indica il materiale di cui è costituito il campione;
- \_n indica il numero del campione.

Con la prima campagna di prove sui compositi FRCM in fibra di carbonio, si è voluto indagare la velocità di raggiungimento delle caratteristiche meccaniche della malta usata come matrice. Per questo motivo sono stati confezionati dodici provini (Fig. 4.4) da testare, in gruppi di tre, con la seguente scansione temporale dettata dalla normativa:

- 7 gg;
- 14 gg;
- 28 gg;
- 72 gg ca., periodo in cui si è effettuato il test su FRCM.

I risultati ottenuti dalle prove di flessione e compressione sono riportati nelle tabelle seguenti.

TEST 7 GG								
Cast	Test	Name	Flex Strength [kg/cm <sup>2</sup> ]	Compressive strength		Flex Strength [Mpa]	Compressive strength	
				[kg]	[kg]		[Mpa]	[Mpa]
14/05/2014	21/05/2014	Rock_S_1	25,80	1580	1640	2,53	9,69	10,06
14/05/2014	21/05/2014	Rock_S_2	28,60	1670	1650	2,81	10,24	10,12
14/05/2014	21/05/2014	Rock_S_3	28,30	1650	1630	2,78	10,12	9,99

Media sperimentale: 

2,70	10,03
------	-------

Tab. 4.3 – Valori ottenuti a 7 gg dal getto.

TEST 14 GG								
Cast	Test	Name	Flex Strength [kg/cm <sup>2</sup> ]	Compressive strength		Flex Strength [Mpa]	Compressive strength	
				[kg]	[kg]		[Mpa]	[Mpa]
14/05/2014	28/05/2014	Rock_S_4	35,70	2370	2440	3,50	14,53	14,96
14/05/2014	28/05/2014	Rock_S_5	34,90	2510	2510	3,42	15,39	15,39
14/05/2014	28/05/2014	Rock_S_6	29,00	2550	2570	2,84	15,63	15,76

Media sperimentale: 

3,26	15,28
------	-------

Tab. 4.4 – Valori ottenuti a 14 gg dal getto.

TEST 28 GG								
Cast	Test	Name	Flex Strength [kg/cm <sup>2</sup> ]	Compressive strength		Flex Strength [Mpa]	Compressive strength	
				[kg]	[kg]		[Mpa]	[Mpa]
14/05/2014	11/06/2014	Rock_S_7	33,10	2180	2250	3,25	13,37	13,80
14/05/2014	11/06/2014	Rock_S_8	40,60	2740	2800	3,98	16,80	17,17
14/05/2014	11/06/2014	Rock_S_9	37,20	2400	2400	3,65	14,72	14,72

Media sperimentale: 

3,63	15,09
------	-------

Tab. 4.5 – Valori ottenuti a 28 gg dal getto.

TEST PERIODO PROVA								
Cast	Test	Name	Flex Strength	Compressive strength		Flex Strength	Compressive strength	
			[kg/cm <sup>2</sup> ]	[kg]	[kg]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
14/05/2014	25/07/2014	Rock_S_10	43,20	2900	2860	4,24	17,78	17,54
14/05/2014	25/07/2014	Rock_S_11	35,50	2850	2880	3,48	17,47	17,66
14/05/2014	25/07/2014	Rock_S_12	30,50	2350	2450	2,99	14,41	15,02
Media sperimentale:						3,57	16,65	

Tab. 4.6 – Valori ottenuti il giorno dei test sui compositi FRCM rinforzati con C-NET 170BL.

In Fig. 4.5 viene mostrato l'andamento dei valori di resistenza a compressione e flessione medi per i provini testati con la suddetta scansione temporale.

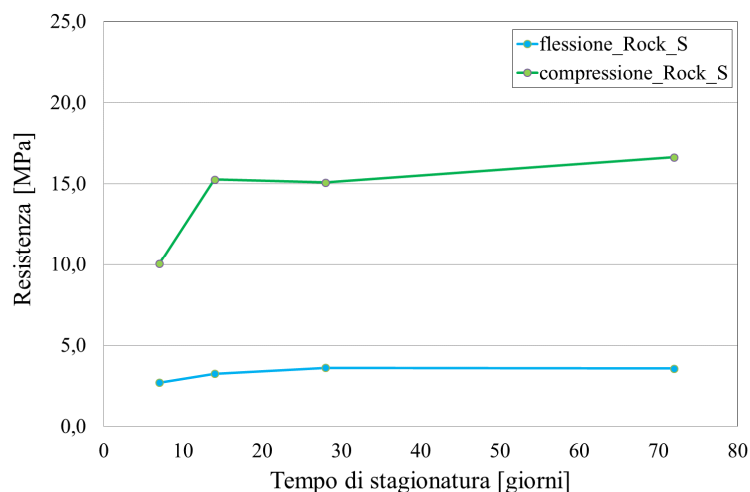


Fig. 4.5 – Andamento dei valori di resistenza medi per i campioni Rock S della prima campagna di prove.

Dai valori medi ottenuti in laboratorio, la resistenza a compressione non raggiunge il valore dichiarato dal produttore, attestandosi a circa il 60% dei 25 MPa previsti (Allegato 1).

Valori di resistenza a trazione o flessione non vengono dichiarati.

## 4.2.2 CARATTERIZZAZIONE “CONCRETE ROCK S” DELLA SECONDA CAMPAGNA DI PROVE

Durante la preparazione dei provini per la seconda campagna di prove, dedicata ai compositi rinforzati con fibra di vetro, sono stati confezionati cinque provini di malta con la modalità descritta in precedenza, per le prove di flessione e compressione. Esse sono state eseguite solamente al ventottesimo giorno dal getto, per tutti i provini, in concomitanza con l'esecuzione dei test di taglio diretto sui campioni FRCM.

La Tab. 4.7 riporta i valori ottenuti. La notazione utilizzata è la stessa del paragrafo precedente.

TEST 28 GG - PERIODO PROVA								
Cast	Test	Name	Flex Strength	Compressive strength		Flex Strength	Compressive strength	
			[kg/cm <sup>2</sup> ]	[kg]	[kg]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
13/08/2014	16/09/2014	Rock_S_13	45,10	2870,00	2830,00	4,42	17,60	17,35
13/08/2014	16/09/2014	Rock_S_14	45,20	2750,00	2740,00	4,43	16,86	16,80
13/08/2014	16/09/2014	Rock_S_15	46,20	2900,00	2850,00	4,53	17,78	17,47
13/08/2014	16/09/2014	Rock_S_16	45,40	2750,00	2760,00	4,45	16,86	16,92
13/08/2014	16/09/2014	Rock_S_17	42,20	2750,00	2730,00	4,14	16,86	16,74

Media sperimentale:	4,46	17,12
---------------------	------	-------

Tab. 4.7 – Valori ottenuti a 28 gg dal getto.

## 4.2.3 CARATTERIZZAZIONE “CONCRETE ROCK S” DELLA TERZA CAMPAGNA DI PROVE

Durante la preparazione dei provini per l'ultima campagna di prove, sono stati confezionati tre provini di malta con la modalità descritta in precedenza, testati il ventottesimo giorno dal getto.

La Tab. 4.8 riporta i valori ottenuti. La notazione utilizzata è la stessa del paragrafo precedente.

TEST 28 GG - PERIODO PROVA								
Cast	Test	Name	Flex Strength	Compressive strength		Flex Strength	Compressive strength	
			[kg/cm <sup>2</sup> ]	[kg]	[kg]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
13/08/2014	16/09/2014	Rock_S_13	45,10	2870,00	2830,00	4,42	17,60	17,35
13/08/2014	16/09/2014	Rock_S_14	45,20	2750,00	2740,00	4,43	16,86	16,80
13/08/2014	16/09/2014	Rock_S_15	46,20	2900,00	2850,00	4,53	17,78	17,47
13/08/2014	16/09/2014	Rock_S_16	45,40	2750,00	2760,00	4,45	16,86	16,92
13/08/2014	16/09/2014	Rock_S_17	42,20	2750,00	2730,00	4,14	16,86	16,74

Media sperimentale:	4,46	17,12
---------------------	------	-------

Tab. 4.8 – Valori ottenuti a 28 gg dal getto.

### 4.3 PROVE DI TRAZIONE SULLE FIBRE

Il riferimento normativo per l'esecuzione dei test di trazione sulle sole fibre di rinforzo è l'ASTM D3039 "Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials" [5]. Il numero di campioni per ogni prova è sempre stato superiore a tre.

Lo scopo dei test è di determinare le caratteristiche meccaniche del materiale impiegato come rinforzo nel composito, verificando l'attendibilità della scheda tecnica fornita dal produttore.

Le prove di trazione sono state eseguite su campioni costituiti da un singolo fascio longitudinale della rete, con lunghezza di 50 cm. Alle estremità sono state applicate delle piastre di alluminio preventivamente smerigliato, di dimensioni circa 20x60 mm e spessore 2 mm, incollate con resina epossidica bicomponente (Resin 75, Allegato 4), aventi la funzione di trasferire il carico dalla ganascia della macchina di prova alla fibra senza danneggiare quest'ultima. Il test è stato condotto mediante una macchina universale Galdabini Sun 2500, con capacità di carico pari a 25 kN. La velocità della prova, pari a 0.5 mm/min, è stata decisa partendo dalla stima della deformazione ultima dichiarata dal produttore in modo da raggiungerla in un tempo pari a 10 minuti, come indicato dalla normativa di riferimento [10].

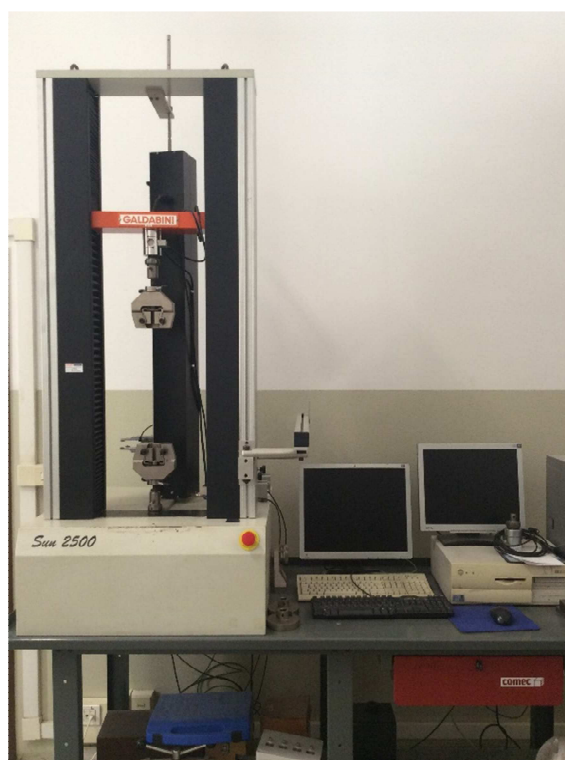


Fig. 4.6 - Macchina universale Galdabini Sun 2500.

### 4.3.1 FIBRA DI CARBONIO C-NET 170BL

La rete in fibra di carbonio C-NET 170BL (Allegato 2), fornita dall'azienda G&P Intech, è formata da fasci di fibre bidirezionali. I fasci trasversali sono disposti in modo alternato rispetto ai fasci longitudinali. La larghezza di un singolo fascio  $b^*$  è pari a 4 mm mentre lo spessore nominale  $t^*$  è di 0.047 mm. L'area di un singolo fascio è stata fissata in  $0.94 \text{ mm}^2$  con il metodo di calcolo descritto a seguire.

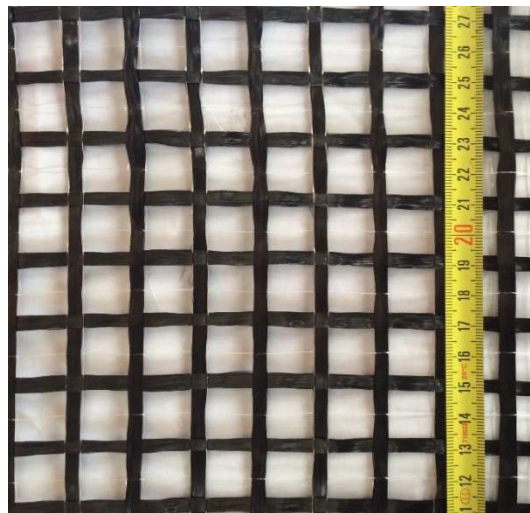


Fig. 4.7 – Rete in fibra di carbonio C-NET 170BL.

C-NET 170 BL	
Grammatura	170 $\text{g/m}^2$
Modulo elastico	240 GPa
Resistenza a rottura filamento	4700 MPa
Allungamento ultimo	1,8 %

Tab. 4.9 – Valori caratteristici dichiarati dal produttore.

Come descritto nel paragrafo precedente, prima dei test sono state applicate delle piastre di alluminio di spessore 2 mm, al fine di omogeneizzare la pressione di serraggio indotta dall'organo di presa della macchina ed evitare una concentrazione delle tensioni alle estremità del fascio.

I campioni testati vengono classificati con la notazione "C-NET 170 BL\_n", dove:

- C-NET 170 BL: indica il materiale in esame
- n: indica il numero progressivo del campione



I valori ricavati dalle prove sono riportati in Tab. 4.10.

Provino	Larghezza [mm]	Area singolo fascio [mm <sup>2</sup> ]	n° di fasci	Carico di rottura (P*) [N]	Resistenza a trazione [MPa]
C-NET 170 BL_1	4	0,94	1	887,6	944
C-NET 170 BL_2	4	0,94	1	828,5	881
C-NET 170 BL_3	4	0,94	1	1219,1	1297
C-NET 170 BL_4	4	0,94	1	1227,5	1306
C-NET 170 BL_5	4	0,94	1	1132,6	1205
C-NET 170 BL_6	4	0,94	1	1161,8	1236

valore scartato  
valore scartato

Valore medio [MPa]	1185	1261
Coefficiente di variazione	0,033	0,033

Tab. 4.10 – Risultati delle prove di trazione sulle fibre C-NET 170BL.

Dei sei campioni testati, due sono stati scartati a causa di un valore del carico di rottura significativamente ridotto rispetto agli altri (Fig. 4.8). Nonostante ciò, la media calcolata sulle resistenze dei singoli provini è risultata pari a 1261 MPa, corrispondente a circa il 27% della tensione massima dichiarata. Il motivo di questa discrepanza potrebbe risiedere in una diversa valutazione dell'area resistente da parte del produttore. Il prodotto  $b^* \times t^*$  darebbe luogo infatti ad un'area nettamente inferiore a quella riportata in Tab. 4.10, calcolata considerando  $t^*$  come lo spessore nominale di un foglio di fibre di carbonio largo 1m. La sezione risultante è stata divisa per 50, cioè il numero di fasci presenti in 1m in base alla maglia di C-NET 170BL, ottenendo la sezione del fascio testato.

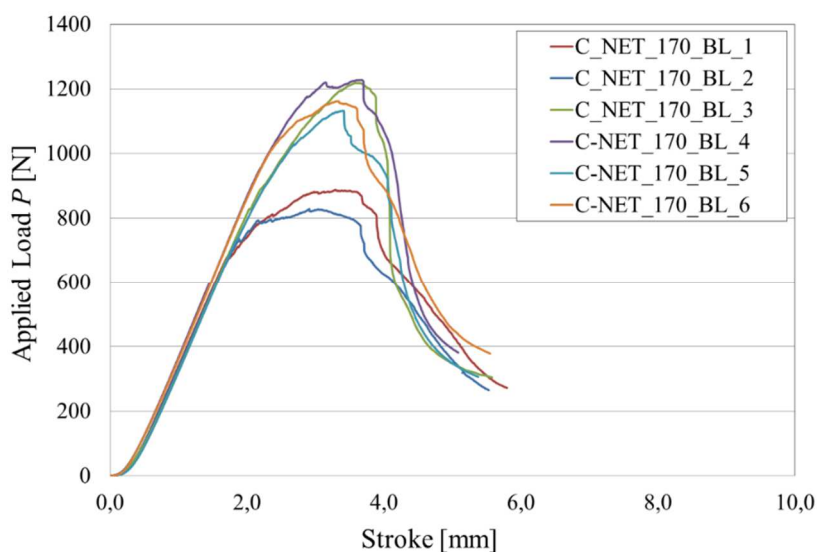


Fig. 4.8 – Grafico carico-spostamento delle prove di trazione sui campioni C-NET 170BL.

Il meccanismo di rottura non è stato istantaneo e non ha interessato una zona localizzata della fibra. Il collasso è avvenuto per la rottura diffusa e progressiva delle singole fibre costituenti il fascio, generando nella risposta di carico un appiattimento della curva, visibile in Fig. 4.8.

La Fig. 4.9 mostra il particolare di un provino dopo il test. E' possibile osservare il rigonfiamento del fascio dovuto alla rottura diffusa dei filamenti che lo costituiscono. A sinistra, il set up di prova con gli organi di presa della macchina ancorati alle piastre in alluminio applicate ai fasci.



Fig. 4.9 – A sinistra, set up delle prove di trazione. A destra, particolare della rottura di un provino.

### 4.3.2 FIBRA DI VETRO G-NET 251BA

G-NET 251 BA (Allegato 3), fornita dall'azienda G&P Intech, è una rete di rinforzo a maglie intrecciate in vetro AR (alta resistenza). La fibra contiene una percentuale di ossido di zirconio superiore al 16%, che ne permette l'impiego anche in ambienti alcalini, tipici delle malte cementizie e a base di calce. La fibra presenta un trattamento superficiale, definito appretto, che ne migliora la compatibilità e le caratteristiche di adesione con il supporto (Cap. 2.2).

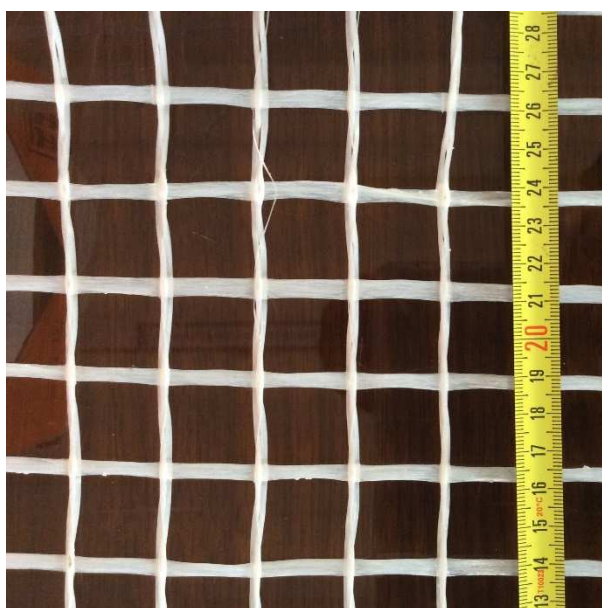


Fig. 4.10 – Rete in fibra di vetro G-NET 251BA.

G-NET 251 BA	
Grammatura	250 g/m <sup>2</sup>
Modulo elastico	70 GPa
Resistenza a rottura filamento	>2000 MPa
Allungamento ultimo	3 %

Tab. 4.11 – Valori caratteristici dichiarati dal produttore.

Sono stati testati cinque provini analoghi a quelli descritti in precedenza per le prove su fibra di carbonio. Un singolo fascio longitudinale di lunghezza 50 cm con piastre di alluminio alle estremità, applicate mediante incollaggio con Resin 75 (Fig. 4.11). G-NET 251BA si presenta molto più rigido di C-NET 170-BL, quindi è stato necessario maneggiare i provini con molta cura per evitare di danneggiare le fibre da sottoporre ai test.

La Fig. 4.11 mostra la fase di preparazione dei provini in cui viene predisposto e successivamente riempito il cassero di cartone per il confinamento della resina.

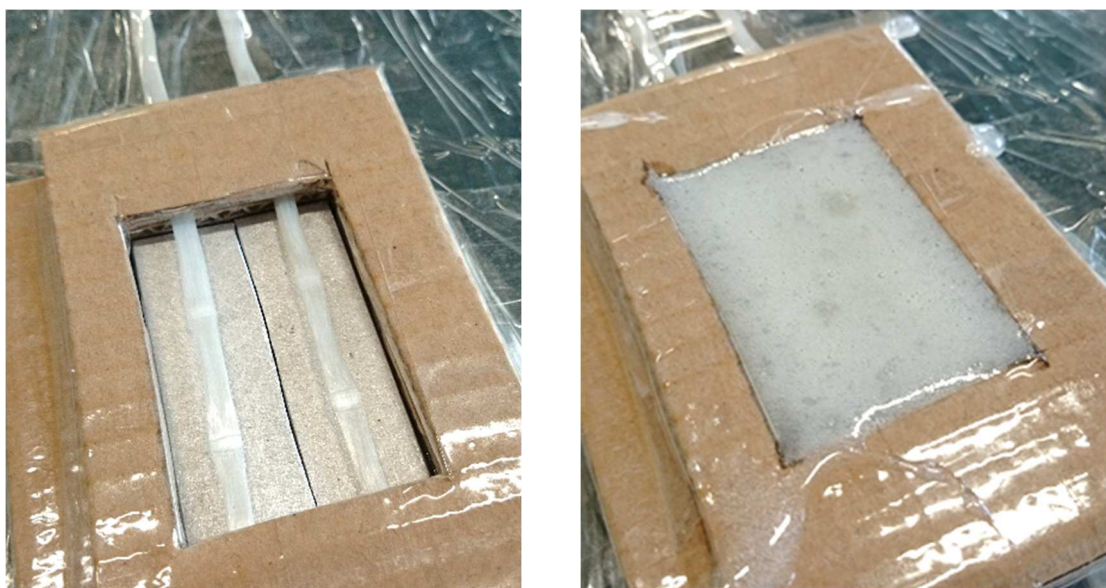


Fig. 4.11 – Predispensione e riempimento del cassero con Resin 75 per l'incollaggio delle piastre.

E' possibile notare a sinistra la superficie smerigliata delle piastre in alluminio, per migliorare l'aderenza della resina. Lo stesso trattamento è stato applicato alle facce esterne delle piastre, per garantire una maggiore presa da parte della macchina di prova. Il cassero visibile in figura comprende per praticità due campioni, i quali, dopo l'applicazione delle piastre superiori e l'asciugatura della resina (7 gg, Allegato 4), sono stati separati mediante taglio lungo la linea di giunzione delle piastre.

I campioni testati vengono classificati con la notazione "G-NET 251 BA\_n", dove:

- G-NET 251 BA: indica il materiale in esame
- n: indica il numero progressivo del campione

I valori ricavati dalle prove sono riportati in Tab. 4.12.

Provino	Larghezza [mm]	Area singolo fascio [mm <sup>2</sup> ]	n° di fasci	Carico di rottura (P*) [N]	Resistenza a trazione [MPa]
G-NET 251 BA_1	5	1,25	1	863,0	690
G-NET 251 BA_2	5	1,25	1	905,3	724
G-NET 251 BA_3	5	1,25	1	928,9	743
G-NET 251 BA_4	5	1,25	1	888,0	710
G-NET 251 BA_5	5	1,25	1	902,0	722
Valore medio [MPa]				897,4	718
Coefficiente di variazione				0,024	0,024

Tab. 4.12 - Risultati delle prove di trazione sulle fibre G-NET 251BA.

La media calcolata sulle resistenze dei singoli campioni è risultata pari a 718 MPa, corrispondente a circa il 35% della tensione massima dichiarata dal produttore. Analogamente a quanto descritto per le fibre di carbonio, si pensa che la differenza sia dovuta ad un diverso calcolo della sezione resistente. L'area di un singolo fascio riportata in Tab. 4.12 è ottenuta dividendo la sezione di un foglio di dimensioni 1m x t\* per 40, cioè il numero di fasci presenti nella larghezza di 1m secondo la maglia di G-NET 251BA.

La Fig. 4.12 riporta il grafico della risposta di carico dei provini testati. Si nota un andamento abbastanza uniforme delle cinque curve sovrapposte, con una improvvisa caduta di carico in corrispondenza della rottura del campione. Non è presente, come nel caso della fibra di carbonio, una progressiva diminuzione della pendenza della curva prima della rottura, evidenziando un comportamento più fragile da parte della fibra di vetro in esame.

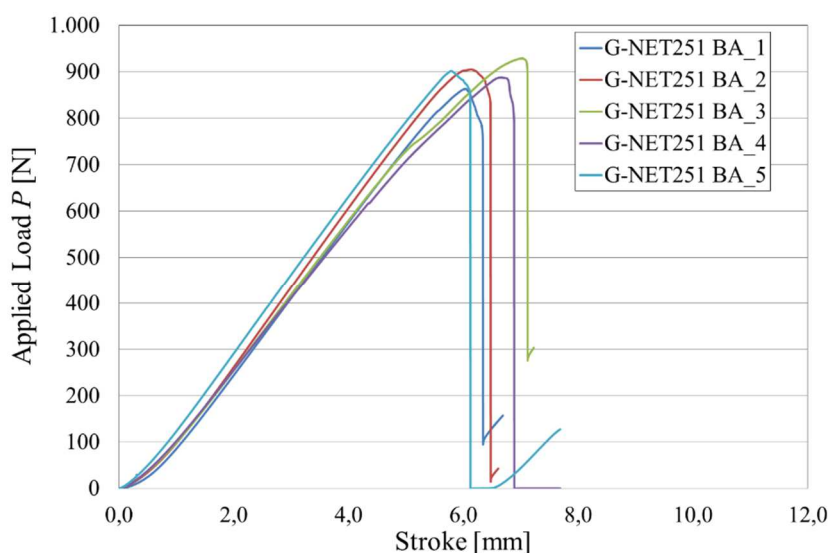
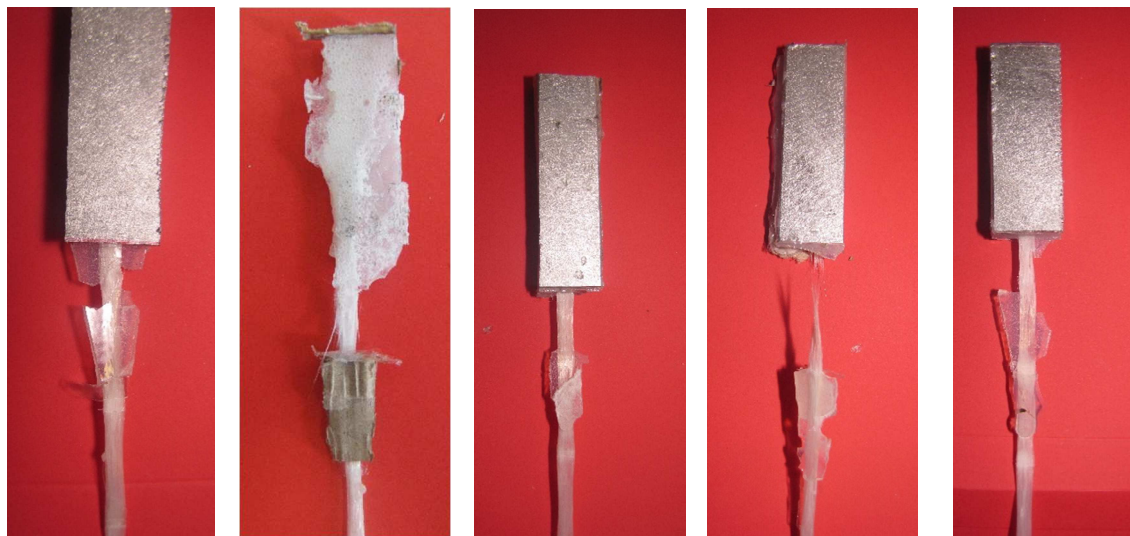


Fig. 4.12 - Grafico carico-spostamento delle prove di trazione sui campioni G-NET 251BA.

Nonostante i valori di carico abbastanza omogenei, si sono riscontrate modalità di rottura differenti. In particolar modo il cedimento si è sempre localizzato nella zona di ancoraggio. I campioni G-NET 251 BA\_1, e G-NET 251 BA\_3 hanno presentato uno scorrimento della fibra all'interno della resina, senza alcun segno di danneggiamento del fascio; G-NET 251 BA\_2, G-NET 251 BA\_4 e G-NET 251 BA\_5 hanno raggiunto il carico massimo per rottura vera e propria del fascio di fibre. In Fig. 4.13 sono riportate in dettaglio le zone in prossimità dell'ancoraggio. Nelle immagini (b) ed (e) è possibile notare una strizione per cedimento delle fibre più esterne del fascio. Per il provino G-NET 251 BA\_2 sono state rimosse le piastre di alluminio a prova conclusa, al fine di indagare visivamente lo scorrimento del fascio all'interno dello strato di resina.



G-NET 251BA\_1

G-NET 251BA\_2

G-NET 251BA\_3

G-NET 251BA\_4

G-NET 251BA\_5

*Fig. 4.13 - Particolare della rottura dei provini in prossimità delle piastre di ancoraggio*

## 5. SPERIMENTAZIONE

### 5.1 OGGETTO DELLA SPERIMENTAZIONE

Nelle pagine seguenti sono descritte le fasi di preparazione di 31 provini di compositi FRCM applicati su calcestruzzo, con diverse fibre di rinforzo e lunghezze di incollaggio. Successivamente viene presentato il set up delle prove di taglio diretto a cui sono stati sottoposti, ed infine sono riportati e discussi i risultati ottenuti.

Le prove sono state condotte nel “Laboratorio Sperimentale per le Prove sui Materiali da Costruzione” del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale della Facoltà di Ingegneria di Padova. Tutto il materiale utilizzato per preparare i provini è stato fornito dalla ditta “G&P Intech”.

### 5.2 PREPARAZIONE DEI PROVINI

La Fig. 5.1 riporta il modello seguito per la preparazione dei provini. Il substrato per l'applicazione dei compositi FRCM è costituito da 12 prismi di calcestruzzo di dimensioni 125x125x500 mm, preparati in una precedente sperimentazione con calcestruzzo di tipo tradizionale preadato per impiego strutturale [9]. E' stato effettuato un trattamento di sabbiatura superficiale su tre facce di ognuno, per asportare ogni traccia delle precedenti applicazioni e portare così a nudo la superficie del calcestruzzo.

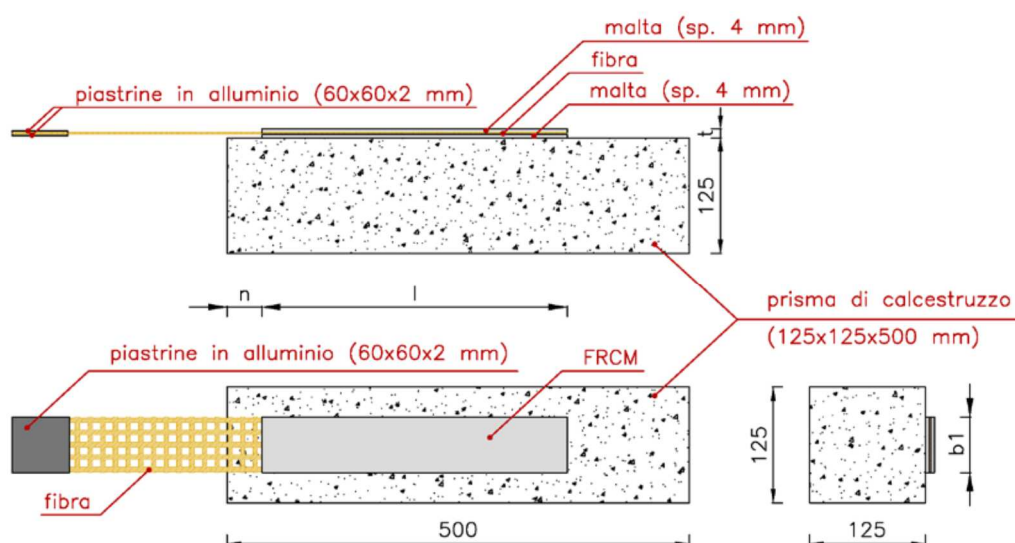


Fig. 5.1 – Viste schematiche di un provino. [9]

Sulla base delle sperimentazioni precedenti, si è optato per una preparazione dei campioni in tre fasi successive, in modo da occupare per ogni fase una sola faccia dei dodici prismi di calcestruzzo. Se l'applicazione avesse interessato tre facce di ogni prisma contemporaneamente, ci sarebbe stata la probabilità di danneggiare i compositi durante le operazioni di montaggio e smontaggio dei campioni dalla macchina di prova. In questo modo, invece, si è potuto operare con maggior sicurezza senza alterare le caratteristiche dei provini.

Di seguito è illustrata la preparazione dei provini seguendo l'ordine con cui si sono svolte le fasi di laboratorio.

### 5.2.1 PRIMA CAMPAGNA DI PROVE – FRCM + C-NET 170BL

Il primo turno di applicazioni è stato eseguito con malta Rock S e rinforzo con rete in fibra di carbonio C-NET 170 BL.

I 12 provini sono stati divisi in 4 gruppi da tre campioni ciascuno, a seconda della lunghezza di aderenza (l): 100, 200, 330 e 450 mm.

Per una perfetta stesura della matrice sono state costruite delle maschere di cartone spesso 4 mm, plastificate mediante nastro adesivo ed usate come cassero per ottenere strati di malta delle dimensioni volute (Fig. 5.2).



Fig. 5.2 – Stesura del primo strato di matrice Rock S all'interno del cassero inferiore.



Ogni cassero è stato posizionato in modo che il foro fosse centrato con l'asse del provino ed avesse una distanza di 38 mm dal bordo superiore del prisma di calcestruzzo (distanza indicata con "n" in Fig. 5.1). La larghezza del foro, coincidente con la larghezza di applicazione del composito FRCM, è rimasta costante per tutti i provini e pari a 60 mm.

La prima maschera di cartone, a contatto diretto con il substrato, è stata fissata ai bordi con del nastro adesivo. Affinché parte della malta non fluisse al di sotto della maschera e aderisse al prisma, si è proceduto in precedenza a plastificare la superficie di calcestruzzo sotto il cassero con del nastro adesivo (provino in alto in Fig. 5.4). Applicato il primo strato di malta e rasato con una cazzuola, è stata posizionata la fibra con i fasci longitudinali paralleli alla lunghezza del cassero (Fig. 5.3).



*Fig. 5.3 – Applicazione del rinforzo in fibra C-NET 170BL sullo strato inferiore della matrice.*

La larghezza di applicazione di 60 mm è tale per cui risultino compresi nella matrice tre fasci longitudinali di rete, lasciando una distanza tra fasci esterni e bordo di 10 mm. Si è fatto in modo che la fibra sporgesse di 250 mm all'estremità superiore e per circa 15 mm all'estremità inferiore del provino, con lo scopo di verificare lo scorrimento delle fibre durante il test e determinare eventuali rotture dei fasci all'interno del composito. Successivamente è stata posizionata la maschera di cartone superiore, all'interno della quale è stato gettato il secondo strato di malta di spessore 4 mm (Fig. 5.4). Durante questa fase, parte della malta è stata utilizzata per confezionare dei provini destinati alla caratterizzazione meccanica della matrice. Completati i getti, i provini di composito FRCM sono stati posti a maturare a temperatura e umidità controllate.



*Fig. 5.4 – Applicazione dello strato esterno di matrice, confinata dal cassero superiore.*



*Fig. 5.5 – Campione DS\_CS17\_100\_60\_2 a preparazione ultimata.*

A maturazione avvenuta, prima di condurre le prove di taglio diretto è stato necessario trattare opportunamente la parte esterna delle fibre del composito per garantire il corretto trasferimento del carico alla matrice, ripartirlo tra i fasci verticali (evitando rotture al di fuori del composito) e prevenire danneggiamenti nella fase di set up.



*Fig. 5.6 – Impregnazione delle fibre esterne con resina ed applicazione di piastre in alluminio.*

Le fibre sono state impregnate con resina epossidica bicomponente Resin 75 della ditta G&P Intech (Allegato 4), dichiarata compatibile con il tipo di rinforzo adottato. Per l'applicazione è stato necessario disporre i provini in serie e costruire appositi casseri in cartone, impermeabilizzati con un film plastico di polietilene.

Analogamente alle prove di trazione sulle sole fibre, è stato predisposto un sistema di ancoraggio con piastre di alluminio, per la distribuzione della pressione indotta dal serraggio della macchina di prova e migliorare l'aderenza. Prima del getto della resina è stata posizionata la piastra di alluminio inferiore, di dimensioni 60x60x2 mm. Garantita quindi l'impossibilità per la resina di fluire all'esterno dei casseri e posizionata la piastra di ancoraggio inferiore di alluminio, è stata adagiata la rete in fibra di carbonio C-NET 170BL, avendo cura di mantenere l'orizzontalità in tutti i punti della sua lunghezza. E' stata versata la resina all'interno dei casseri ed infine posizionata la piastra di alluminio superiore.

Il tempo di attesa per l'asciugatura della resina è stato di 7 giorni.

I provini sono stati classificati secondo la notazione DS\_FMN\_X\_Y\_Z, dove:

- DS = direct shear (prova di taglio diretto);
- F = tipologia della fibra usata (C = carbonio; G = vetro);
- M = malta utilizzata (S = Rock S);
- N = valore numerico riferito alla grammatura della fibra;
- X = lunghezza di incollaggio (l) in mm;
- Y = larghezza di incollaggio (b1) in mm;
- Z = numero del provino.

La Tab. 5.1 riporta in sintesi i provini confezionati e testati nella prima campagna di prove.

Provino	b <sub>1</sub> [mm]	L [mm]	Malta	Fibra	Numero di fasci
DS_CS17_100_60_1	60	100	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_100_60_2	60	100	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_100_60_3	60	100	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_200_60_1	60	200	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_200_60_2	60	200	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_200_60_3	60	200	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_330_60_1	60	330	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_330_60_2	60	330	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_330_60_3	60	330	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_450_60_1	60	450	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_450_60_2	60	450	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_450_60_3	60	450	Rock_S	C-NET 170 BL	3

Tab. 5.1 – Tabella dei provini confezionati per il primo turno di prove.

## 5.2.2 SECONDA CAMPAGNA DI PROVE – FRCM + G-NET 251BA

La seconda serie di test è stata condotta su 12 provini confezionati con malta Rock S e rete in fibra di vetro G-NET 251BA. La procedura seguita per l'applicazione della matrice cementizia e del rinforzo è simile a quella esposta nel paragrafo precedente. L'applicazione del composito FRCM è avvenuta sulla faccia adiacente a quella utilizzata nella prima campagna di prove, dopo aver rimosso i relativi residui rimasti.

Le lunghezze di incollaggio sono state 100, 200, 330 e 450 mm, analogamente ai provini con rinforzo in fibra di carbonio. Diversamente, la larghezza di applicazione è stata di 55 mm, in modo che fossero inclusi tre fasci longitudinali e quelli esterni toccassero il bordo del cassero (Fig. 5.7).

Come per il rinforzo in fibra di carbonio, si è fatto in modo che la fibra sporgesse di 250 mm all'estremità superiore e per circa 15 mm all'estremità inferiore del provino, con lo scopo di verificare lo scorrimento delle fibre durante il test e determinare eventuali rotture dei fasci all'interno del composito.



Fig. 5.7 – Vista del rinforzo G-NET 251BA prima della stesura dello strato superiore della matrice.

Le fibre di vetro, in virtù del processo di apprettatura subito, risultano particolarmente rigide e fragili, per cui è stato necessario prestare una particolare cura nella manipolazione della rete durante le fasi di preparazione dei provini. Analogamente ai campioni della campagna di prove precedente, le fibre esterne alla matrice hanno subito un'impregnazione con Resin 75 (paragrafo precedente).

I provini sono stati classificati secondo la notazione DS\_FMN\_X\_Y\_Z, dove:

- DS = direct shear (prova di taglio diretto);
- F = tipologia della fibra usata (C = carbonio; G = vetro);
- M = malta utilizzata (S = Rock S);
- N = valore numerico riferito alla grammatura della fibra;
- X = lunghezza di incollaggio (l) in mm;
- Y = larghezza di incollaggio (b1) in mm;
- Z = numero del provino.

La Tab. 5.2 riporta in sintesi i provini confezionati e testati nella seconda campagna di prove.

Provino	b <sub>1</sub> [mm]	L [mm]	Malta	Fibra	Numero di fasci
DS_GS25_100_55_1	55	100	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_100_55_2	55	100	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_100_55_3	55	100	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_200_55_1	55	200	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_200_55_2	55	200	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_200_55_3	55	200	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_330_55_1	55	330	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_330_55_2	55	330	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_330_55_3	55	330	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_450_55_1	55	450	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_450_55_2	55	450	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_450_55_3	55	450	Rock_S	G-NET 251 BA	3

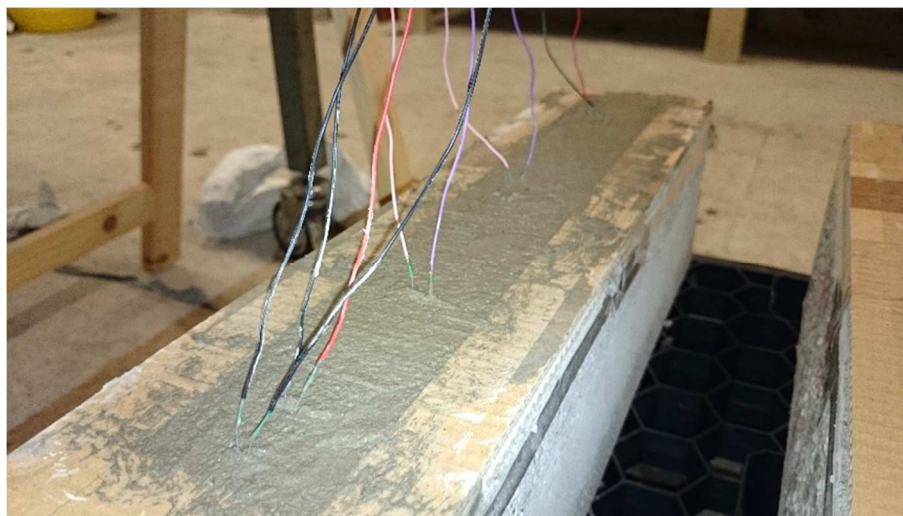
Tab. 5.2 - Tabella dei provini confezionati per il secondo turno di prove.

### 5.2.3 TERZA CAMPAGNA DI PROVE – PROVINI DI RECUPERO E STRAIN GAUGES

Nella terza ed ultima fase della sperimentazione è stato necessario ripetere i test per alcuni campioni, al fine di convalidare i risultati ottenuti in precedenza. Sono stati preparati 4 provini simili a quelli già eseguiti:

- DS\_CS17\_100\_60\_4
- DS\_CS17\_330\_60\_4
- DS\_GS25\_100\_55\_4
- DS\_GS25\_200\_55\_4

Questa fase della sperimentazione ha visto anche la preparazione di provini di lunghezza ( $l$ ) 450 mm e larghezza ( $b_1$ ) 60 mm, con rinforzo C-NET 170BL, in cui sono stati applicati sulla fibra centrale dei particolari misuratori di deformazione definiti “strain gauges” (Fig. 5.8).



*Fig. 5.8 – Provino dotato di misuratori di deformazione “strain gauges”.*

Per la preparazione generale di questi campioni è stato seguito il procedimento relativo ai provini del primo turno di prove, descritto al paragrafo 5.2.1. Le porzioni di rete C-NET 170BL, identiche a quelle usate per confezionare i provini della serie DS\_CS17\_450\_60, sono state strumentate con i misuratori di deformazione prima di essere inglobate nei due strati di matrice. Gli strain gauges sono stati posizionati nei punti in cui si è ritenuta più interessante la rilevazione delle deformazioni durante la prova di taglio diretto (Fig. 5.9).

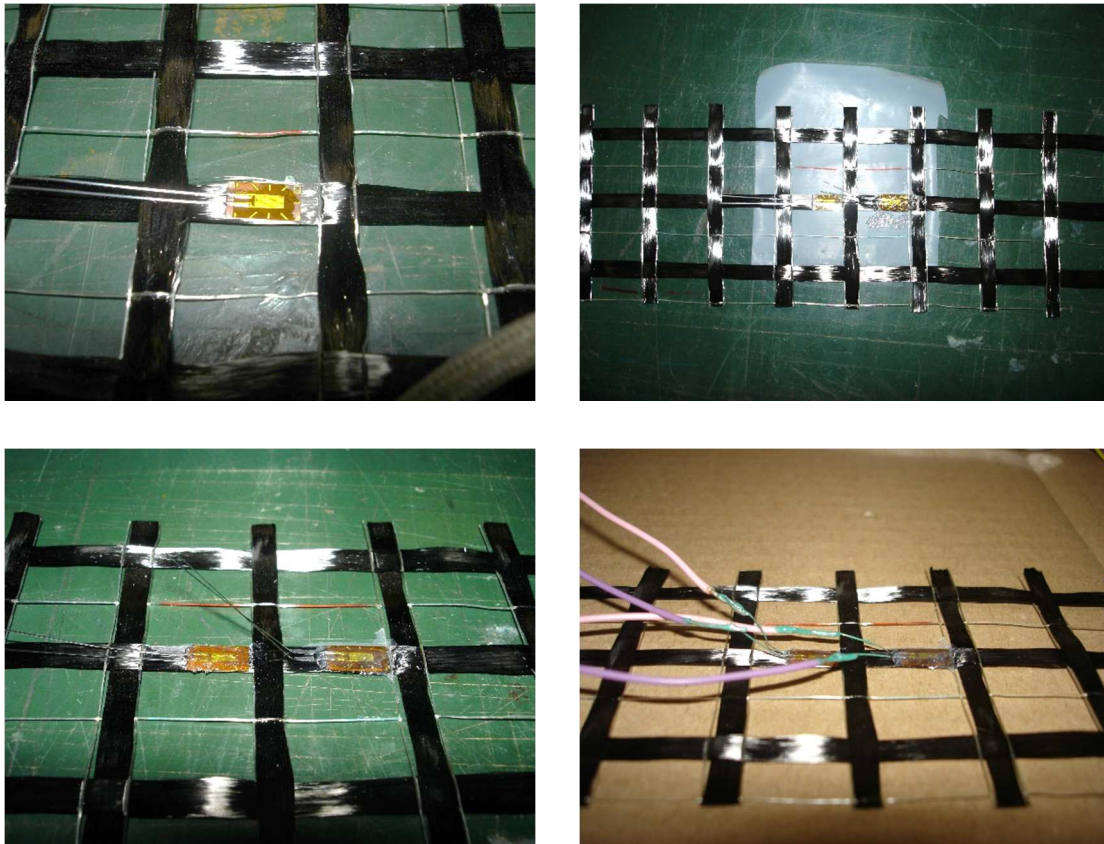


Fig. 5.9 – Particolari dell'applicazione degli strain gauges lungo il fascio centrale del rinforzo.

Per applicare gli strain gauges alla fibra si è proceduto con la pulizia della zona di adesione con un prodotto a base di alcol isopropilico e acetone al fine di eliminare ogni residuo di grasso o polvere. Successivamente è stato utilizzato un adesivo monocomponente a base di 2-cianoacrilato di metile per connettere i dispositivi al carbonio. Applicata una piccolissima quantità sulla fibra, lo strain gauge è stato messo a contatto e premuto per circa un minuto. Per evitare che l'adesivo incollasse la fibra al piano di lavoro o alla pelle, sono stati usati due fogli di teflon, posizionati sotto e sopra lo strain gauge.

Per isolare il dispositivo dalla matrice cementizia ed impedirne l'interazione, per quanto possibile, dopo l'applicazione sulla fibra è stato ricoperto da un sottile strato di silicone (Fig. 5.9, immagine in basso a sinistra).

Successivamente si è proceduto a saldare i contatti degli strain gauges a dei cavi elettrici di piccolo diametro che sarebbero stati connessi alla macchina di prova per l'invio del segnale. Nel punto di giunzione è stato spalmato un sottile strato di smalto, con lo scopo di isolare i cavi scoperti ed evitare contatti durante la fase del getto della malta. Ciò avrebbe comportato l'alterazione della resistenza propria dello strumento, pari a 120 Ohm (Allegato 5).



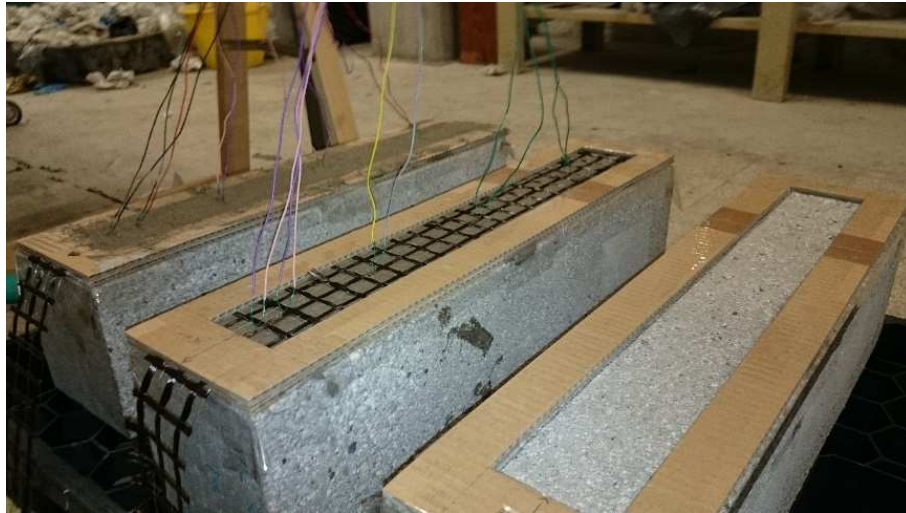


Fig. 5.10 – Provini DS\_CS17\_450\_60\_S in diverse fasi di lavorazione.

In totale sono stati applicati sei strain gauges: cinque direttamente sulla fibra immersa nella matrice ed uno sulla resina in corrispondenza del fascio centrale (Fig. 5.11).

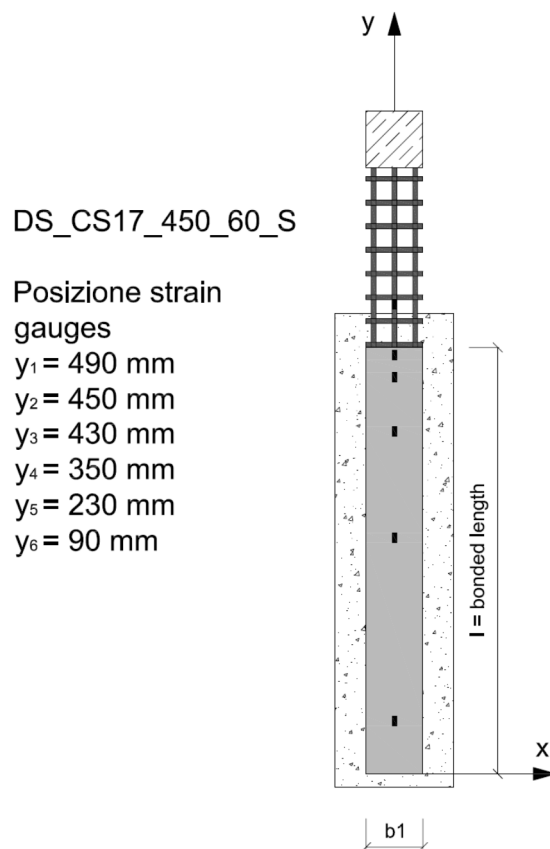


Fig. 5.11 – Schema del posizionamento degli strain gauges lungo il fascio centrale del rinforzo.

La denominazione dei provini con strain gauges è DS\_FMN\_X\_Y\_S\_Z, dove:

- DS = direct shear (prova di taglio diretto);
- F = tipologia della fibra usata (C = carbonio; G = vetro);
- M = malta utilizzata (S = Rock S);
- N = valore numerico riferito alla grammatura della fibra;
- X = lunghezza di incollaggio (l) in mm;
- Y = larghezza di incollaggio (b1) in mm;
- S = presenza di strain gauges;
- Z = numero del provino.

Le Tab. 5.3 e 5.4 riportano i provini confezionati e testati nella terza campagna di prove.

Provino	b <sub>1</sub> [mm]	L [mm]	Malta	Fibra	Numero di fasci
DS_CS17_100_60_4	60	100	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_330_60_4	60	330	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_GS25_100_55_4	55	100	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_200_55_4	55	200	Rock_S	G-NET 251 BA	3

Tab. 5.3 – Tabella dei provini di recupero per il terzo turno di prove.

Provino	b <sub>1</sub> [mm]	L [mm]	Malta	Fibra	Numero di fasci
DS_CS17_450_60_S_1	60	450	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_450_60_S_2	60	450	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_450_60_S_3	60	450	Rock_S	C-NET 170 BL	3

Tab. 5.4 – Tabella dei provini dotati di strain gauges per il terzo turno di prove.

### 5.3 PROSPETTO DEI PROVINI DELLA SPERIMENTAZIONE

Come descritto in precedenza, durante le prove di taglio diretto solo una delle facce dei prismi di calcestruzzo è stata occupata dal composito FRCM. L'insieme di tutti i provini preparati durante le tre campagne della sperimentazione è illustrato in Fig. 5.12. Sono evidenziati in rosso i campioni con G-NET 251BA, in blu i provini con C-NET 170BL, in verde i recuperi per vetro e carbonio e in azzurro i campioni con strain gauges su carbonio.

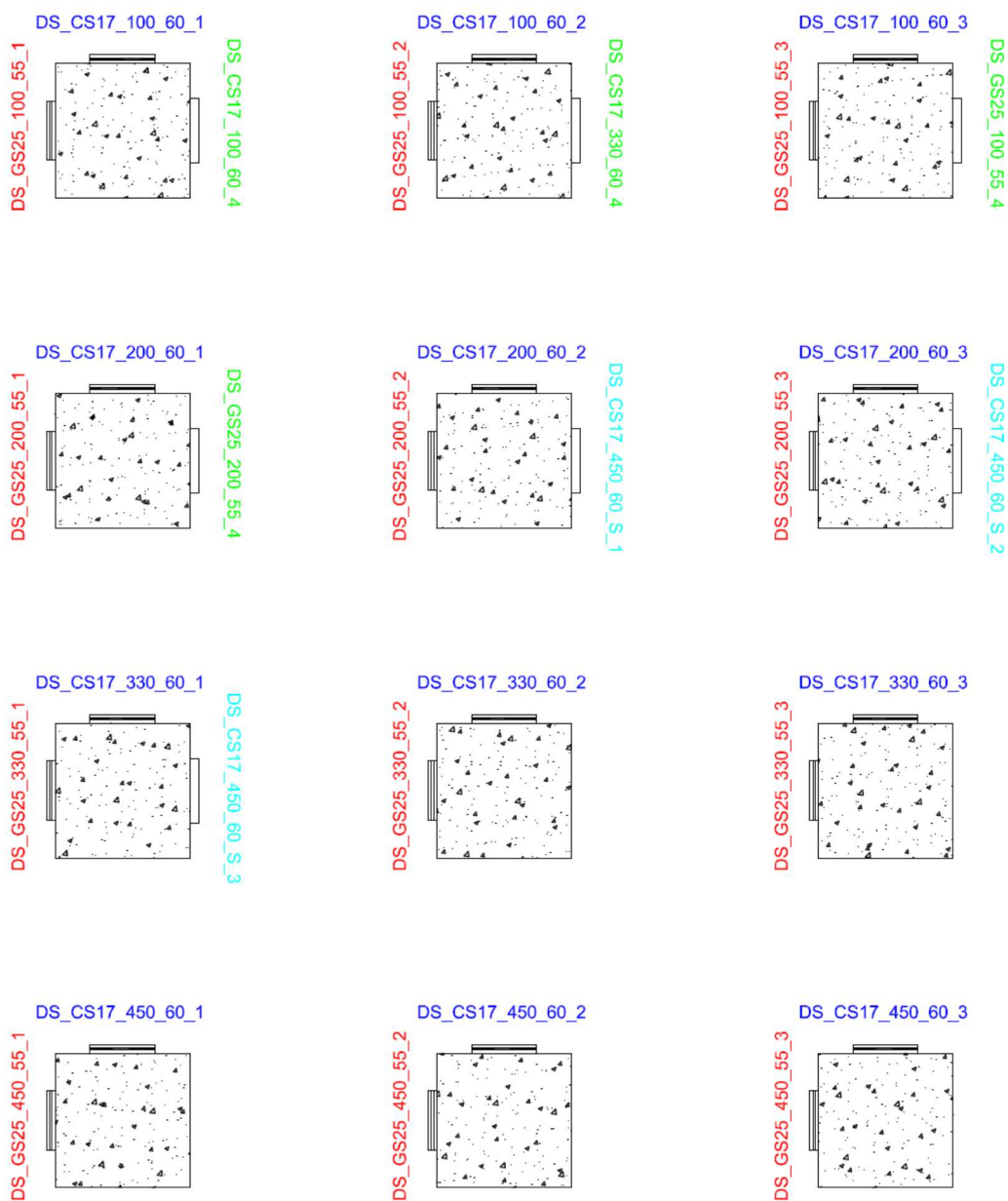


Fig. 5.12 – Prospetto riassuntivo dei provini delle tre campagne di prove della sperimentazione.

## 5.4 SET UP DELLA PROVA DI TAGLIO DIRETTO

Le prove di taglio diretto singolo condotte sui provini di composito FRCM illustrati in precedenza, sono state eseguite con il metodo push-pull a controllo di spostamento. In particolare è stata applicata una forza di trazione alle fibre esterne alla matrice, mentre il prisma di calcestruzzo è stato trattenuto. E' stata utilizzata una macchina di prova universale Galdabini Sun 60, con capacità di carico nominale pari a 600 kN e corsa massima della traversa di 1270 mm (Fig. 5.13).



Fig. 5.13 – Macchina di prova universale Galdabini Sun 60.

Il prisma di calcestruzzo, in posizione verticale, poggia con la faccia quadrata inferiore su una piastra d'acciaio vincolata alla testa fissa della macchina, mentre la faccia superiore viene trattenuta attraverso una seconda piastra d'acciaio collegata alla base con 4 barre filettate (Fig. 5.14). Tra la piastra superiore ed il prisma di calcestruzzo è stata interposta una sottile piastra di piombo, con lo scopo di uniformare le tensioni sulla superficie. Le piastre di alluminio 60x60x2 mm all'estremità delle fibre esterne resinare, sono state inserite all'interno dei due piatti in acciaio bullonati tra loro e connessi con un giunto a cerniera alla testa mobile della macchina. E' stata posta una particolare attenzione all'atto del posizionamento del provino, per garantire che la direzione di trazione della macchina fosse perfettamente in asse sia frontalmente che lateralmente con il composito FRCM applicato al substrato.

Per quanto riguarda il sistema di acquisizione dati, è stato utilizzato un apparato esterno collegato a tre LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) ed alla cella di carico della macchina. Gli LVDT, che formalmente sono delle induttanze variabili, inviano i dati raccolti al sistema di acquisizione in termini di spostamento. Nella configurazione usata, gli LVDT sinistro e destro hanno rilevato gli spostamenti, mentre quello centrale ha avuto la doppia funzione di leggere gli spostamenti ed inviare informazioni alla macchina sulla velocità di trazione applicata al provino nel punto di distacco. Il sistema così concepito ha imposto che la macchina variasse la velocità di spostamento della traversa per compensare le variazioni misurate di velocità nel punto di applicazione degli LVDT. Per tutte le prove, le velocità si sono attestate attorno al valore di 0.0081 mm/s. Per permettere il montaggio e lo smontaggio dei 3 LVDT in modo agevole, è stato studiato un supporto in alluminio sagomato ad omega che, come un ponte, scavalcasse trasversalmente il composito FRCM pur essendo vincolato al substrato di calcestruzzo. Il contrasto per i potenziometri è stato fornito da una piastra sagomata ad L incollata alla resina in prossimità del bordo superiore della matrice (Fig. 5.15).

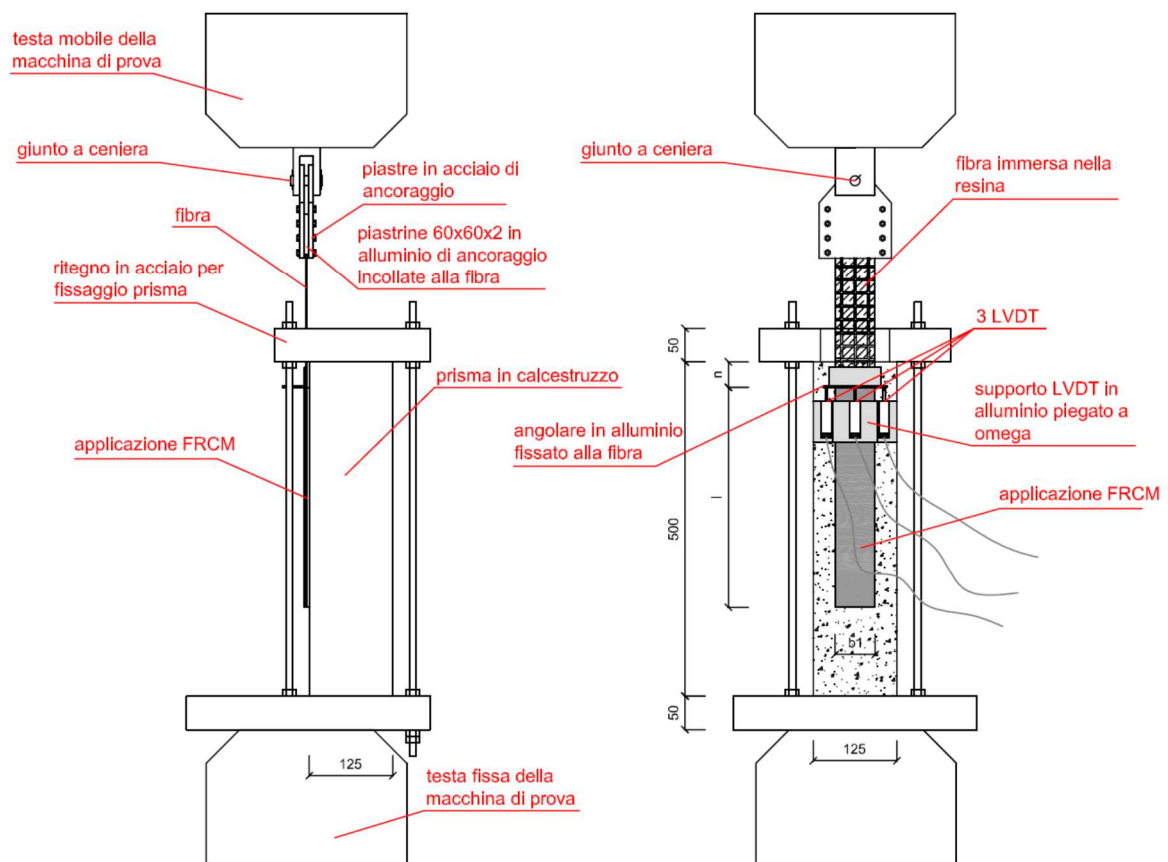


Fig. 5.14 – Schema del set up della prova di taglio diretto.

Al termine di ogni prova di taglio diretto, è stato possibile liberare il provino allentando la presa delle piastre di acciaio collegate alla testa mobile della macchina. Dopodichè si è proceduto a sollevare la piastra di acciaio alla sommità del prisma di calcestruzzo, per sostituire il provino. L'intero supporto degli LVDT si è potuto togliere e riapplicare mediante un adesivo termoplastico. Sono stati impiegati LVDT con una corsa utile pari a 25 mm.

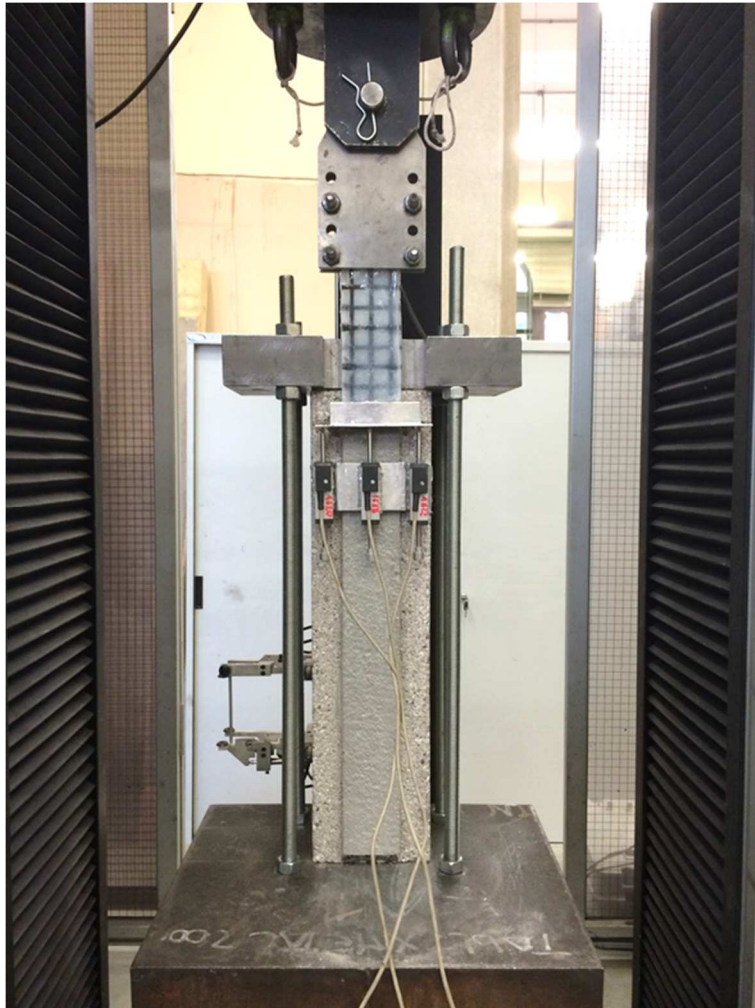


Fig. 5.15 – Set up di una prova di taglio diretto su composito FRCM con rinforzo in carbonio.

## 6. RISULTATI OTTENUTI ED ELABORAZIONE

I paragrafi seguenti riportano i risultati ottenuti dalle prove di taglio diretto condotte durante la sperimentazione. Ad ogni gruppo di prove fa seguito la parte di elaborazione mediante grafici e tabelle.

### 6.1 COMPOSITI FRM RINFORZATI CON C-NET 170BL

#### 6.1.1 SERIE DS\_CS17\_100\_60

I provini appartenenti a questa serie sono stati confezionati con malta Concrete Rock S per la matrice e fibra di carbonio tipo C-NET 170BL come rinforzo. La parte esterna delle fibre è stata impregnata con resina epossidica bicomponente Resin 75, incorporando nel getto anche le piastre di alluminio di ancoraggio alla macchina di prova. La lunghezza di applicazione del composito è di 100 mm e la larghezza di 60 mm.

I carichi massimi raggiunti per questa serie di provini sono stati rispettivamente di 0,748 kN, 0,571 kN, 0,419 kN e 0,417 kN. La Fig. 6.1 mostra la risposta di carico dei quattro provini testati.

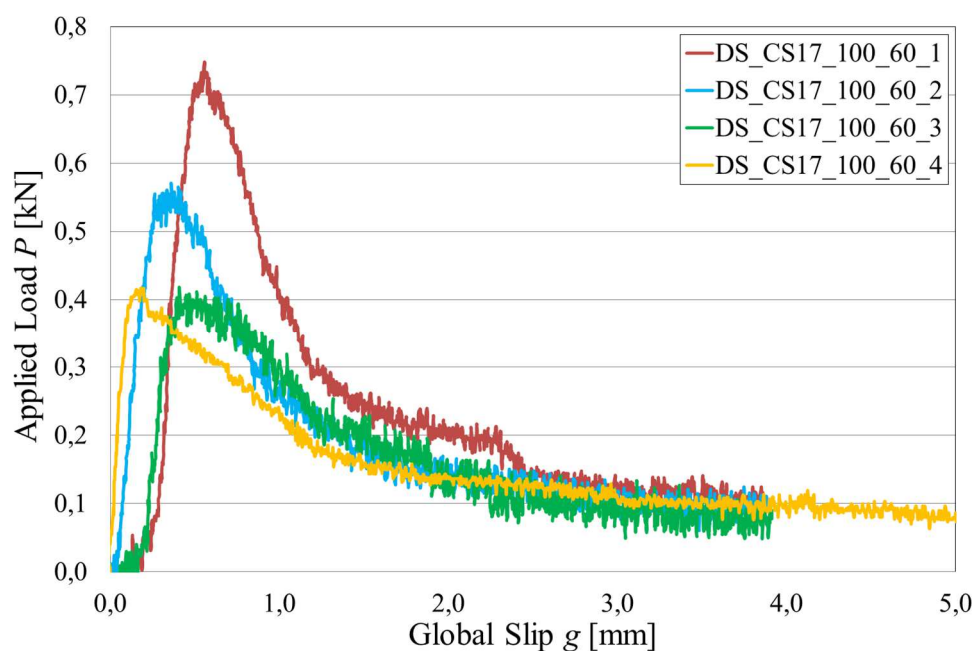


Fig. 6.1 – Risposta di carico dei provini della serie DS\_CS17\_100\_60.

Il campione DS\_CS17\_100\_60\_4 è stato prodotto nella terza fase di preparazione dei provini, come recupero, poiché il DS\_CS17\_100\_60\_3 non ha dato risultati in termini di risposta carico-scorrimento compatibili con gli altri due campioni della prima campagna di prove.

Le modalità di rottura più caratteristiche dei provini vengono presentate Fig. 6.2 e 6.3. In tutti i campioni testati di questa serie si è riscontrata la delaminazione ed il conseguente sfilamento delle fibre senza presentare segni di rottura.



*Fig. 6.2 – Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_CS17\_100\_60\_1.*



*Fig. 6.3 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_CS17\_100\_60\_2.*



### 6.1.2 SERIE DS\_CS17\_200\_60

I provini appartenenti a questa serie sono stati confezionati con malta Concrete Rock S per la matrice e fibra di carbonio tipo C-NET 170BL come rinforzo. La parte esterna delle fibre è stata impregnata con resina epossidica bicomponente Resin 75, incorporando nel getto anche le piastre di alluminio di ancoraggio alla macchina di prova. La lunghezza di applicazione del composito è di 200 mm e la larghezza di 60 mm.

I carichi massimi raggiunti per questa serie di provini sono stati rispettivamente di 0,869 kN, 0,964 kN e 0,762 kN. La Fig. 6.4 mostra la risposta di carico dei tre provini testati.

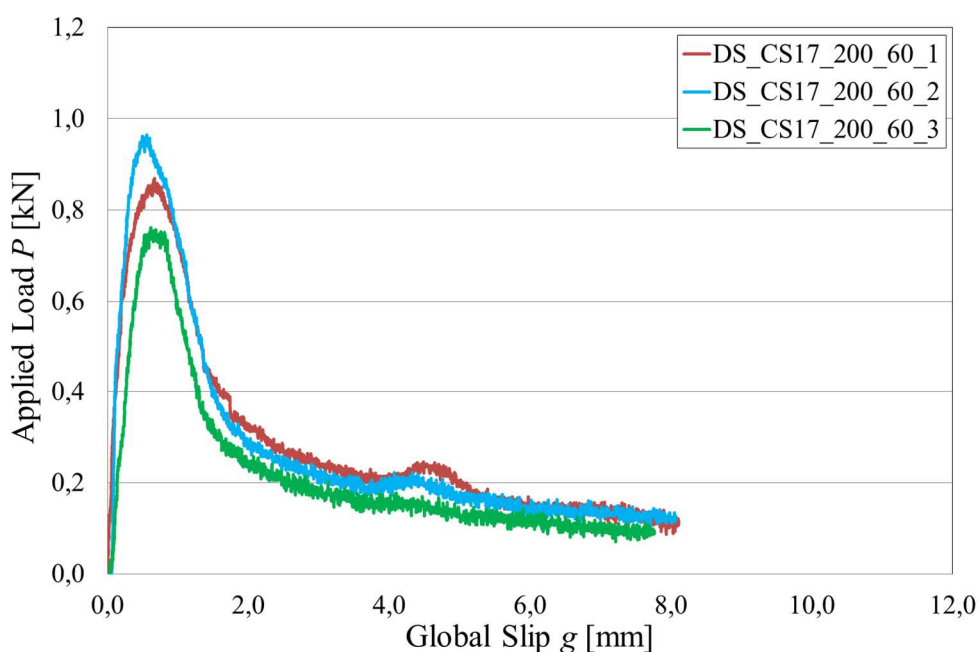


Fig. 6.4 - Risposta di carico dei provini della serie DS\_CS17\_200\_60.



Fig. 6.5 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_CS17\_200\_60\_1.



Fig. 6.6 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_CS17\_200\_60\_2.

Durante la prova di taglio diretto i provini DS\_CS17\_200\_60\_1 e DS\_CS17\_200\_60\_2 hanno mostrato un collasso in cui è visibile una rottura della matrice nella parte superiore (Fig. 6.5 e 6.6). Si suppone che la causa sia l'assorbimento della resina da parte della matrice durante l'impregnazione della fibra esterna, portando ad avere un trasferimento della trazione durante la prova di taglio diretto anche attraverso la matrice stessa.



Fig. 6.7 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_CS17\_200\_60\_3.

Per tutti i campioni si è verificata la delaminazione della fibra all'interfaccia fibra-matrice, evidenziata dallo scorrimento dei fasci all'interno della matrice stessa.

### 6.1.3 SERIE DS\_CS17\_330\_60

I provini appartenenti a questa serie sono stati confezionati con malta Concrete Rock S per la matrice e fibra di carbonio tipo C-NET 170BL come rinforzo. La parte esterna delle fibre è stata impregnata con resina epossidica bicomponente Resin 75, incorporando nel getto anche le piastre di alluminio di ancoraggio alla macchina di prova. La lunghezza di applicazione del composito è di 330 mm e la larghezza di 60 mm.

I carichi massimi raggiunti per questa serie di provini sono stati rispettivamente di 1,571 kN, 1,583 kN, 1,234 kN e 1,639 kN. La Fig. 6.8 mostra la risposta di carico dei quattro provini testati.

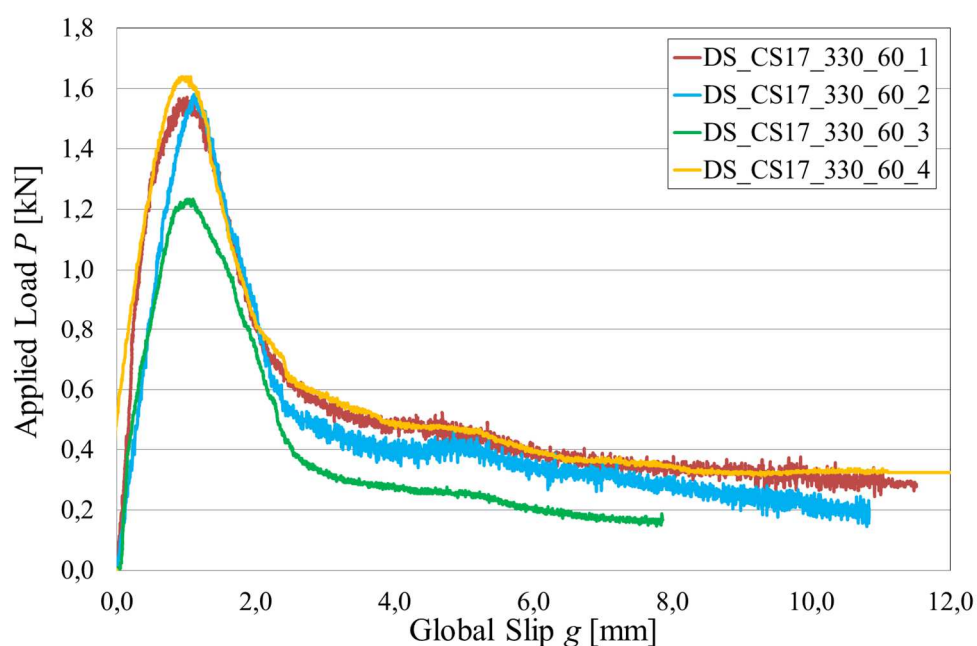


Fig. 6.8 - Risposta di carico dei provini della serie DS\_CS17\_330\_60.

In questa serie di prove è stato testato un campione di recupero (DS\_CS17\_330\_60\_4) poiché il provino DS\_CS17\_330\_60\_3 non ha dato una risposta di carico adeguata. In Fig. 6.9 e 6.10 vengono mostrate le modalità di rottura caratteristiche di questa serie di campioni. In particolare, in Fig. 6.10 è possibile notare come la rottura sia avvenuta principalmente per scorrimento della fibra, evidenziando il cosiddetto comportamento telescopico [7], in quanto le fibre esterne risultano spezzate mentre quelle interne ad ogni fascio non presentano alcun danno apparente. Il campione DS\_CS17\_330\_60\_3 ha fornito un valore di carico di picco significativamente più basso rispetto agli altri ed il motivo potrebbe essere la cattiva impregnazione della fibra con la matrice. Questo avrebbe comportato un'aderenza inferiore nell'interfaccia fibra-matrice, permettendo lo scorrimento delle fibre ad un valore di carico più basso.



Fig. 6.9 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_CS17\_330\_60\_2.



Fig. 6.10 – Particolare della rottura delle fibre del provino DS\_CS17\_330\_60\_3.

### 6.1.4 SERIE DS\_CS17\_450\_60

I provini appartenenti a questa serie sono stati confezionati con malta Concrete Rock S per la matrice e fibra di carbonio tipo C-NET 170BL come rinforzo. La parte esterna delle fibre è stata impregnata con resina epossidica bicomponente Resin 75, incorporando nel getto anche le piastre di alluminio di ancoraggio alla macchina di prova. La lunghezza di applicazione del composito è di 450 mm e la larghezza di 60 mm.

I carichi massimi raggiunti per questa serie di provini sono stati rispettivamente di 1,711 kN, 1,847 kN e 1,541 kN. La Fig. 6.11 mostra la risposta di carico dei tre provini testati.

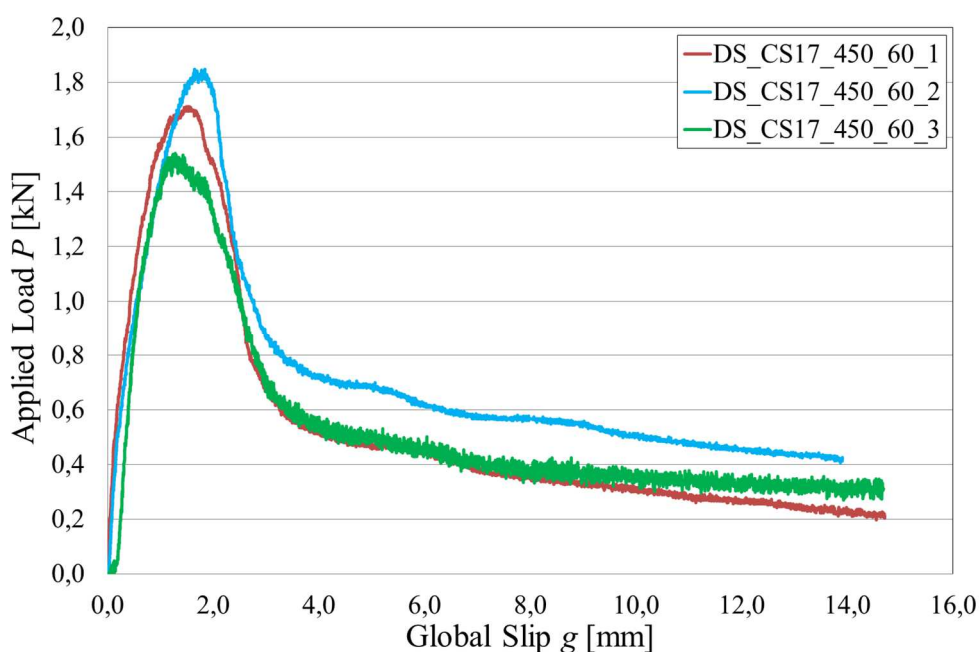


Fig. 6.11 - Risposta di carico dei provini della serie DS\_CS17\_450\_60.

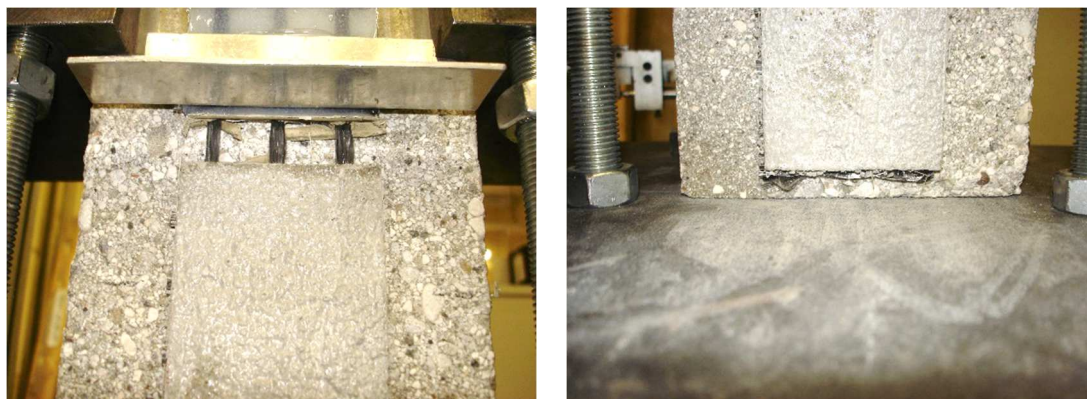


Fig. 6.12 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_CS17\_450\_60\_3.

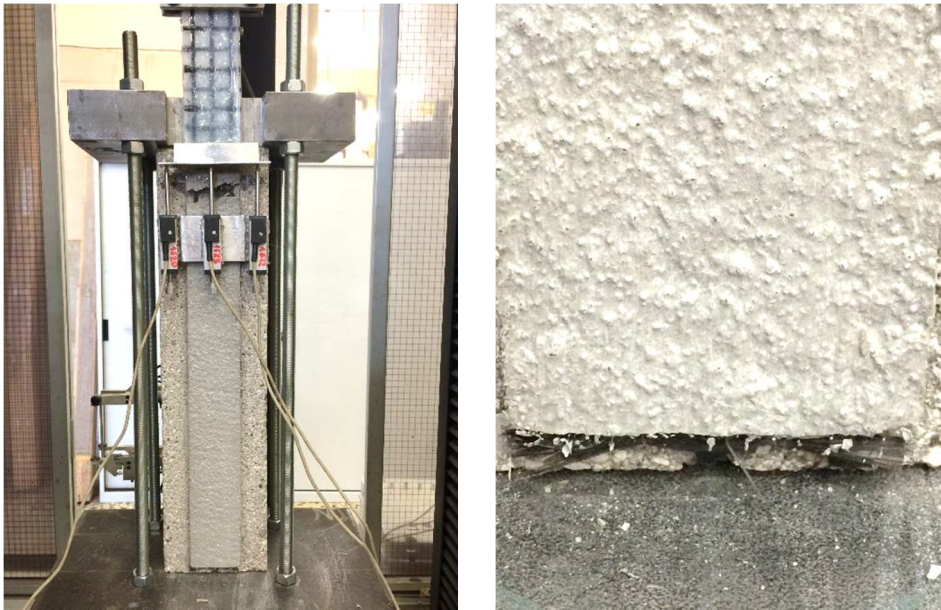


Fig. 6.13 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_CS17\_450\_60\_1.

Per ciascun provino i tre fasci di fibra all'interno del composito si sono delaminati dalla matrice, manifestando uno scorrimento senza rottura. Si può notare che nella parte inferiore di ogni provino (Fig. 6.12, 6.13 e 6.14) alcune fibre si sono raccolte senza entrare nella matrice. Si ipotizza che siano le fibre esterne del fascio ad essere rimaste aderenti alla matrice, mentre quelle interne, meno impregnate dalla malta, siano slittate. Questo comportamento porta a considerare la rottura di tipo telescopico [7].



Fig. 6.14 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_CS17\_450\_60\_2.

## 6.2 CONCLUSIONI FRCM RINFORZATI CON C-NET 170BL

La tabella seguente riporta i dati raccolti dalle prove sui campioni di compositi FRCM rinforzati con fibra di carbonio C-NET 170BL.

Provino	L [mm]	P* [kN]	Avg [kN]
DS_CS17_100_60_1	100	0,748	0,54
DS_CS17_100_60_2	100	0,571	
DS_CS17_100_60_3	100	0,419	
DS_CS17_100_60_4	100	0,417	
DS_CS17_200_60_1	200	0,869	0,87
DS_CS17_200_60_2	200	0,964	
DS_CS17_200_60_3	200	0,762	
DS_CS17_330_60_1	330	1,571	1,60
DS_CS17_330_60_2	330	1,583	
DS_CS17_330_60_3	330	1,234	
DS_CS17_330_60_4	330	1,639	
DS_CS17_450_60_1	450	1,711	1,70
DS_CS17_450_60_2	450	1,847	
DS_CS17_450_60_3	450	1,541	

valore scartato

Tab. 6.1 – Tabella riassuntiva dei carichi massimi ottenuti dalle prove di taglio diretto per i campioni di composito FRCM rinforzati con C-NET 170BL.

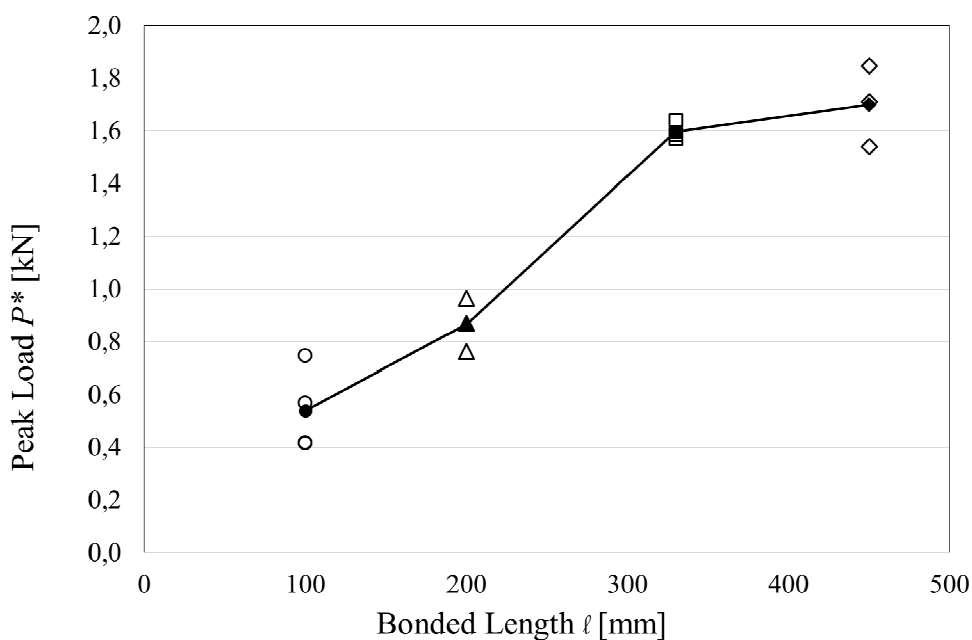


Fig. 6.15 – Grafico carico applicato-lunghezza di incollaggio per C-NET 170BL (length effect).

Scartando i valori troppo distanti dall'andamento generale, è stata calcolata la media dei carichi di picco  $P^*$  ottenuti in ogni serie, ovvero per ogni lunghezza di applicazione (L). Ad ogni valore medio è stata associata la lunghezza a cui si riferisce, ed il tutto è stato elaborato in un grafico con una spezzata che congiunge i valori medi al variare della lunghezza (Fig. 6.15).

Per ogni valore di carico massimo  $P^*$  ottenuto dalle prove è stata poi ricavata la tensione normale  $\sigma^*$  raggiunta dalle fibre (Tab. 6.1), utilizzando la formula seguente:

$$\sigma^* = \frac{P^*}{n \cdot A_{fascio}}$$

dove  $P^*$  è il carico di picco,  $n$  è il numero di fasci presenti nel composito (valore che in questa sperimentazione è sempre pari a 3) e  $A_{fascio}$  rappresenta la sezione effettiva del singolo fascio di fibre. Per il calcolo della sezione della fibra si veda il paragrafo 4.3.1.

Provino	Lunghezza [mm]	$P^*$ [kN]	$\sigma^*$ [MPa]	Coefficiente di sfruttamento
DS_CS17_100_60_1	100	0,748	265	0,21
DS_CS17_100_60_2	100	0,571	202	0,16
DS_CS17_100_60_3	100	0,419	148	0,12
DS_CS17_100_60_4	100	0,417	148	0,12
DS_CS17_200_60_1	200	0,869	308	0,24
DS_CS17_200_60_2	200	0,964	342	0,27
DS_CS17_200_60_3	200	0,762	270	0,21
DS_CS17_330_60_1	330	1,571	557	0,44
DS_CS17_330_60_2	330	1,583	562	0,45
DS_CS17_330_60_3	330	1,234	438	0,35
DS_CS17_330_60_4	330	1,639	581	0,46
DS_CS17_450_60_1	450	1,711	607	0,48
DS_CS17_450_60_2	450	1,847	655	0,52
DS_CS17_450_60_3	450	1,541	546	0,43
Resistenza media C-NET 170 BL [MPa]				1261

Tab. 6.2 - Tabella riassuntiva dei carichi massimi di ogni provino e delle relative tensioni, rapportate alla resistenza media a trazione della fibra C-NET 170BL.

Il coefficiente di sfruttamento in Tab. 6.2 è ricavato dal rapporto tra la tensione massima raggiunta dai fasci del rinforzo nelle prove di taglio diretto e quella raggiunta dalla fibra durante il test di trazione su singolo fascio. Il valore risulta indicativo in quanto è possibile capire quanto la fibra, in termini tensionali, sia sfruttata nel meccanismo resistente di aderenza nel composito FRCM testato. Nel caso in esame, il valore più elevato arriva al 52% della resistenza ultima caratteristica della fibra (C-NET 170BL). Si ipotizza quindi che il tipo di fibra utilizzata in questo gruppo di prove non sviluppi un elevato grado di aderenza con la matrice utilizzata, dovuto probabilmente ad una impregnazione non ottimale.



### 6.3 MISURA DELLE DEFORMAZIONI - SERIE DS\_CS17\_450\_60\_S

In questa serie di prove sono stati testati i campioni dotati di strain gauges lungo il fascio centrale della rete di carbonio. Il campione, a meno della presenza degli strain gauges, è identico a quelli della serie DS\_CS17\_450\_60. Per ogni campione viene presentato un grafico della risposta di carico con indicati, mediante lettere, i punti di carico-spostamento per i quali sono stati riportati gli andamenti delle deformazioni.

#### 6.3.1 PROVINO DS\_CS17\_450\_60\_S\_1

Il valore di carico massimo registrato durante la prova è stato di 1,171 kN. La lunghezza di applicazione del composito FRCM è pari a 450 mm.

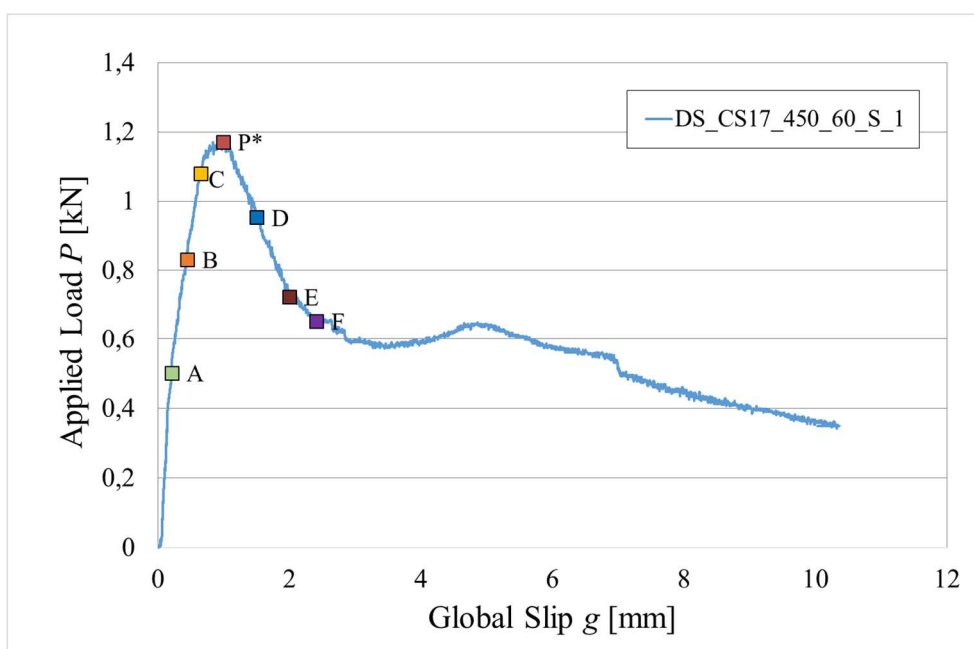


Fig. 6.16 – Risposta di carico per la prova di taglio diretto condotta sul provino DS\_CS17\_450\_60\_S\_1.

In Fig. 6.17 è possibile osservare il particolare set up modificato per eseguire la prova con l'inserimento del sistema di acquisizione degli strain gauges. Data la vicinanza del primo strain gauge al bordo del composito è stato necessario tagliare una porzione dell'angolare in alluminio per permettere il passaggio dei cavi di collegamento.

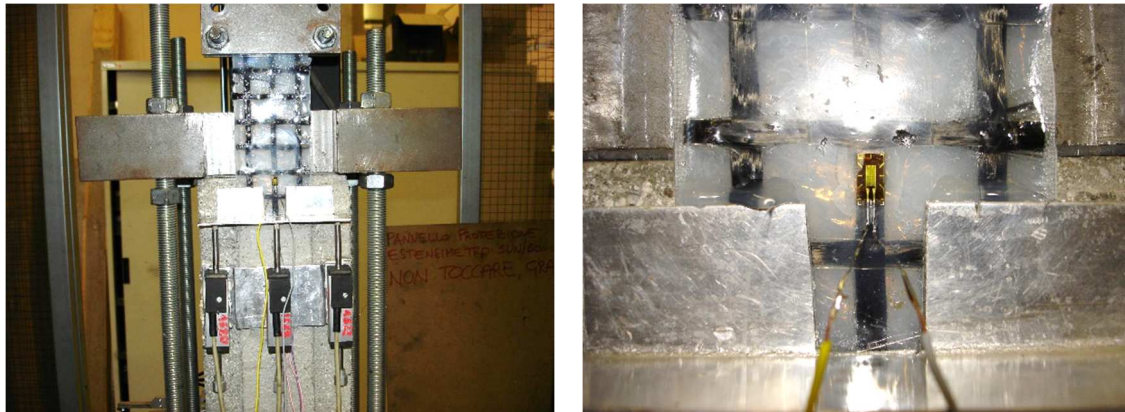


Fig. 6.17 – Set up della prova di taglio diretto per il provino DS\_CS17\_450\_60\_S\_1 e particolare dello strain gauge esterno applicato sulla resina in prossimità del bordo superiore della matrice.

Di seguito vengono mostrate le modalità di rottura del campione analizzato. È ben visibile lo scorrimento della fibra con una successiva separazione dello strato superiore di malta (Fig. 6.18).

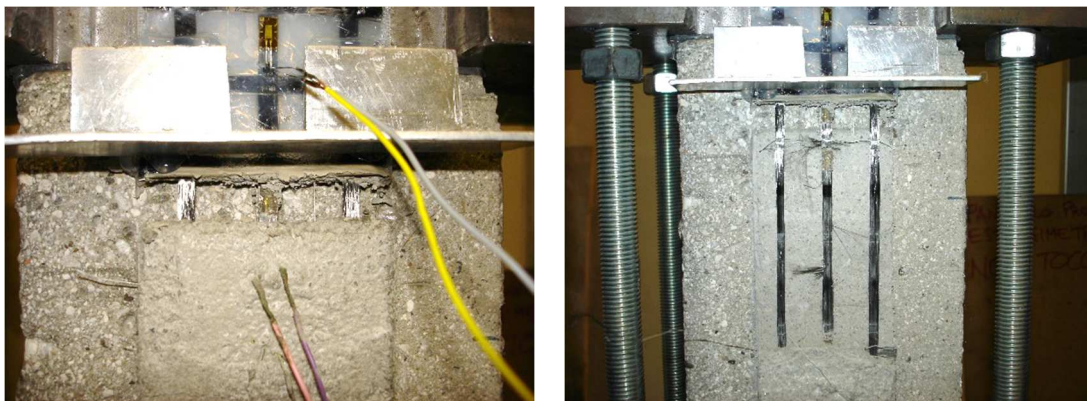


Fig. 6.18 – Esito della prova di taglio diretto. Particolare del distacco dello strato superiore della matrice.

	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Deformazioni strain gauges [ $\mu\epsilon$ ]					
			SG1 (490 mm)	SG2 (450 mm)	SG3 (430 mm)	SG4 (350 mm)	SG5 (230 mm)	SG6 (90 mm)
P*	1,171	0,996	2005	1688	2933	3213	2933	426
A	0,502	0,211	1124	767	2052	2094	171	2
B	0,832	0,442	1633	1310	2622	2979	1412	79
C	1,080	0,650	1947	1751	3018	3395	1840	592
D	0,953	1,505	1812	1532	2713	2697	1001	27
E	0,724	2,000	1568	1453	2518	2117	356	-312
F	0,654	2,415	1479	1332	2362	1787	511	-710

Tab. 6.3 – Valori delle deformazioni misurati per ogni valore di carico scelto.

In Tab 6.3 sono riportati i valori delle deformazioni relative ai carichi scelti per l'analisi, indicati in Fig. 6.16 con delle lettere lungo la curva di risposta del provino.

Lo strain gauge SG1 è applicato al di fuori del composito FRCM, direttamente sulla resina ed in prossimità della matrice, in linea con il fascio centrale. Il valore in mm indicato a fianco dell'identificativo di ogni strain gauge rappresenta la coordinata del punto di applicazione secondo il sistema di assi di Fig. 5.11.

I valori delle deformazioni rilevati, sono stati elaborati per via grafica (Fig. 6.19) riportando in ordinata le deformazioni in microstrain ed in ascissa la coordinata del punto di applicazione.

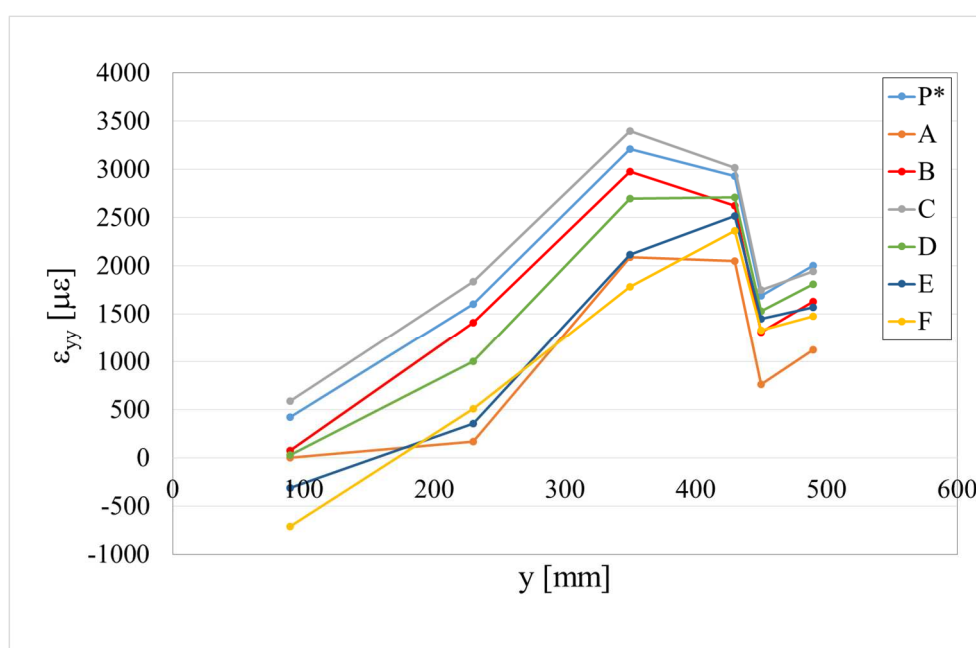


Fig. 6.19 – Grafico delle deformazioni nei punti di applicazione degli strain gauges, rilevate per diversi valori del carico applicato.

In generale è possibile notare che le deformazioni maggiori sono rilevate dagli strain gauges più vicini all'estremità caricata del composito (ulteriori considerazioni sono presentate nel Cap. 6.4). Allontanandosi dalla zona caricata, la deformazione tende a valori nulli. Il comportamento identifica il meccanismo di trasferimento delle tensioni proprio dei compositi FRCM [4]. Idealizzando la curva di risposta di un provino (Fig. 6.20 a), la prima parte del grafico viene rappresentata da un ramo lineare (OA) associato al comportamento elastico del legame tra le fibre e la matrice. Dopo il punto A si ha un tratto non lineare; l'interfaccia tra le fibre e la matrice presenta una qualche microfessurazione. Il valore del carico applicato P aumenta fino al punto B corrispondente all'inizio della delaminazione all'interfaccia matrice-fibra. L'attrito tra singoli filamenti e tra fibre e matrice avviene nella porzione di composito in cui le fibre si sono distaccate; di conseguenza si ha un aumento del

carico applicato anche dopo l'inizio dello scorrimento (punto B). Se si assume che l'attrito dipenda solo dalle caratteristiche del materiale e dall'area di contatto tra le fibre delaminate e la matrice e che non diminuisca con l'aumentare dello scorrimento, si può assumere che il suo contributo aumenti linearmente con l'aumentare della lunghezza delaminata. Una lunghezza efficace  $l_{eff}$ , se esiste, deve quindi essere determinata dalla distribuzione delle deformazioni lungo le fibre nel punto B della risposta di carico, dove l'attrito non è ancora presente.

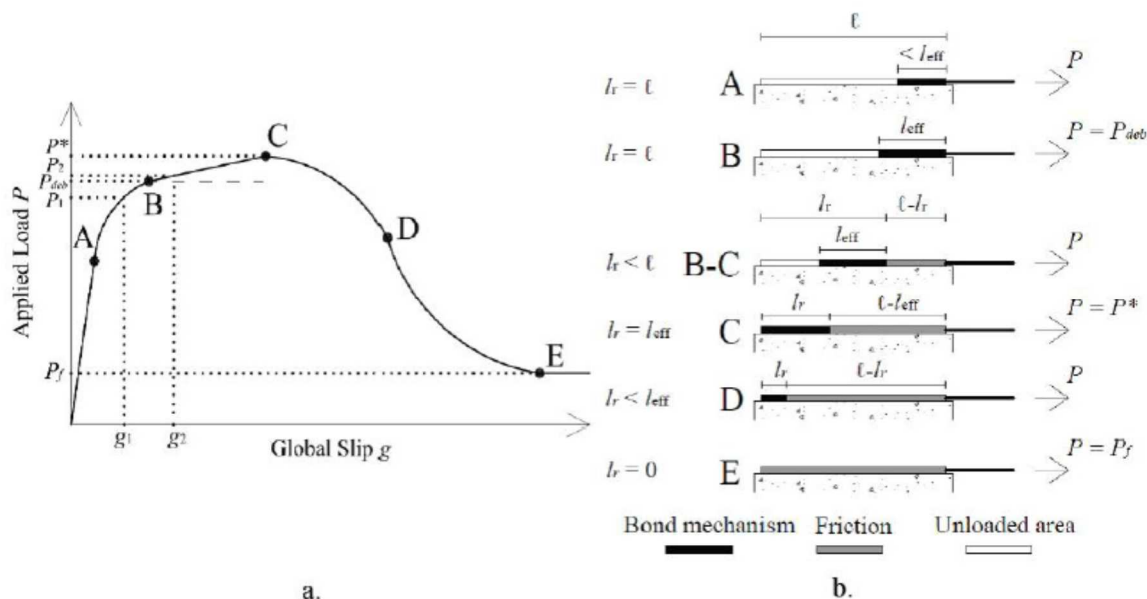


Fig. 6.20 – a) risposta di carico ideale. b) fasi del meccanismo di trasferimento delle sollecitazioni corrispondenti ai punti indicati nella risposta di carico ideale. [4]

Le diverse fasi del meccanismo di trasferimento delle sollecitazioni, per i vari punti della risposta di carico, sono illustrate nella Fig. 6.20 b. La lunghezza di incollaggio residua  $l_r$  è definita come la lunghezza effettiva della zona di incollaggio;  $l_r$  è dunque la lunghezza che si ha prima del punto B o nel punto B. Tra i punti B e C il carico applicato aumenta a causa dell'attrito finché il processo di delaminazione raggiunge la fine dell'area incollaggio. Nel punto C, il carico applicato raggiunge il massimo carico  $P^*$  e la lunghezza di incollaggio residua è uguale alla lunghezza efficace ( $l_r = l_{eff}$ ). Dopo il punto C il carico applicato inizia a diminuire perché il meccanismo di incollaggio non è più completamente stabilito ( $l_r < l_{eff}$ ). Dopo il punto D si ha un cambio di concavità della curva e il carico applicato si riduce più velocemente. In questa fase la lunghezza di incollaggio residua  $l_r$  è considerevolmente ridotta. Nel punto E le fibre sono completamente delaminate dalla matrice ( $l_r = 0$ ) e l'unico contributo viene fornito dall'attrito. La risposta di carico diventa, dunque, costante dopo il punto E al quale corrisponde un valore di carico applicato  $P_f$ .

### 6.3.2 PROVINO DS\_CS17\_450\_60\_S\_2

Il valore di carico massimo registrato durante la prova è stato di 1,269 kN. La lunghezza di applicazione del composito FRCM è pari a 450 mm.

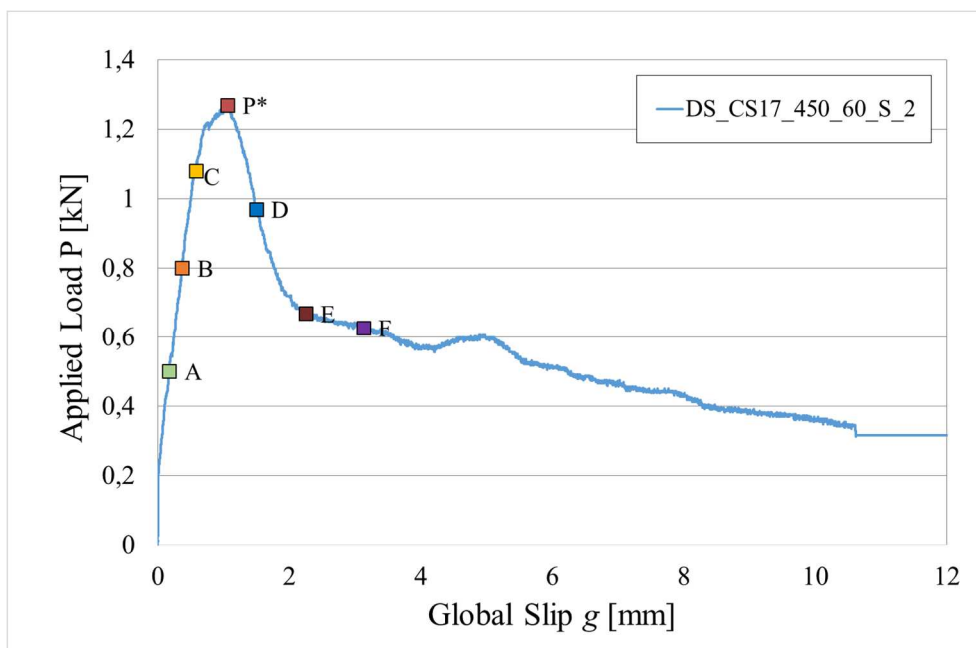


Fig. 6.21 - Risposta di carico per la prova di taglio diretto condotta sul provino DS\_CS17\_450\_60\_S\_2.

Di seguito vengono mostrate le modalità di rottura del campione analizzato. È ben visibile lo scorrimento della fibra all'interno della matrice (Fig. 6.22). A differenza del provino analizzato in precedenza, in questo caso la matrice è rimasta intatta.



Fig. 6.22 - Esito della prova di taglio diretto. Particolare della parte superiore della matrice.

In Tab 6.4 sono riportati i valori delle deformazioni relative ai carichi scelti per l'analisi, indicati in Fig. 6.21 con delle lettere lungo la curva di risposta del provino.

Lo strain gauge SG1 è applicato al di fuori del composito FRCM, direttamente sulla resina ed in prossimità della matrice, in linea con il fascio centrale. Il valore in mm indicato a fianco dell'identificativo di ogni strain gauge rappresenta la coordinata del punto di applicazione secondo il sistema di assi di Fig. 5.11.

I valori delle deformazioni rilevati, sono stati elaborati per via grafica (Fig. 6.23) riportando in ordinata le deformazioni in microstrain ed in ascissa la coordinata del punto di applicazione.

	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Deformazioni strain gauges [ $\mu\epsilon$ ]					
			SG1 (490 mm)	SG2 (450 mm)	SG3 (430 mm)	SG4 (350 mm)	SG5 (230 mm)	SG6 (90 mm)
P*	1,269	1,063	1590	2721	4071	2736	2635	624
A	0,501	0,173	733	841	2870	1167	104	3
B	0,800	0,371	1090	1382	3452	1753	1674	5
C	1,080	0,577	1424	1908	3877	2308	2347	255
D	0,970	1,501	1322	2266	3365	2087	1800	365
E	0,669	2,250	1089	2325	3121	1650	824	372
F	0,627	3,131	1074	2399	3285	1991	-15	351

Tab. 6.4 - Valori delle deformazioni misurati per ogni valore di carico scelto.

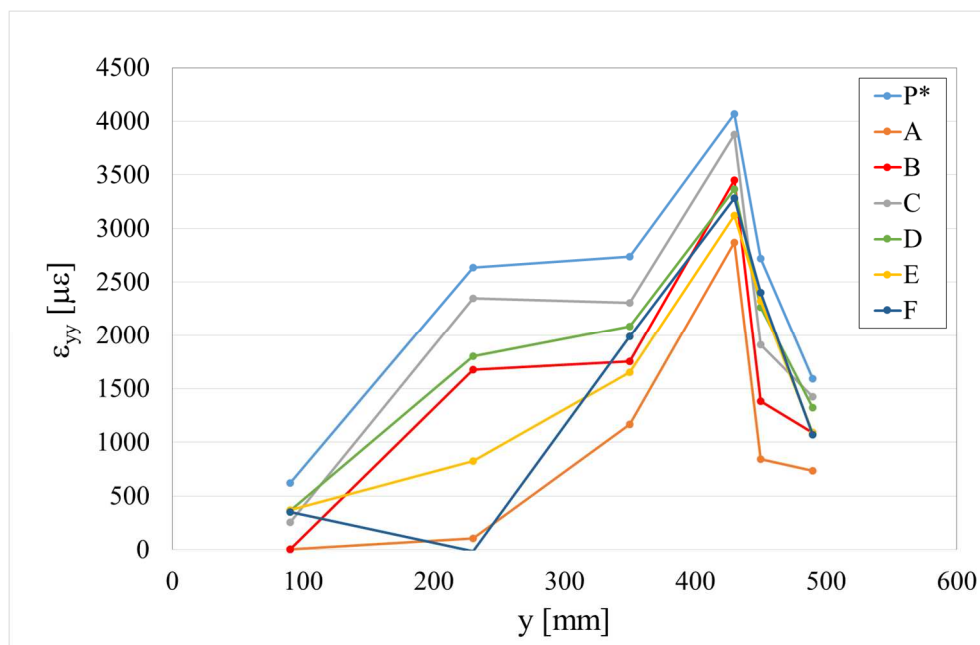


Fig. 6.23 - Grafico delle deformazioni nei punti di applicazione degli strain gauges, rilevate per diversi valori del carico applicato.

### 6.3.3 PROVINO DS\_CS17\_450\_60\_S\_3

Il valore di carico massimo registrato durante la prova è stato di 1,540 kN. La lunghezza di applicazione del composito FRCM è pari a 450 mm.

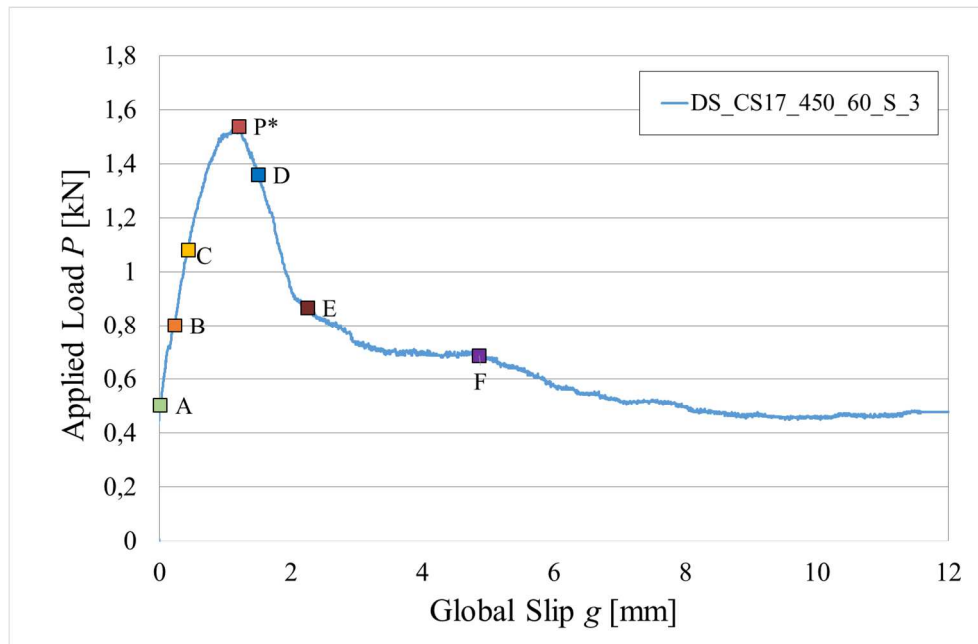


Fig. 6.24 - Risposta di carico per la prova di taglio diretto condotta sul provino DS\_CS17\_450\_60\_S\_3.

Di seguito vengono mostrate le modalità di rottura del campione analizzato. Come per il provino DS\_CS17\_450\_60\_S\_1, la rottura è avvenuta principalmente attraverso lo scorrimento delle fibre, con il parziale distacco dello strato di matrice esterna (Fig. 6.25). Un particolare interessante è costituito dal danneggiamento della fibra centrale, dovuto probabilmente all'interazione tra lo strain gauge e la matrice durante la prova di taglio diretto (Fig. 6.26).

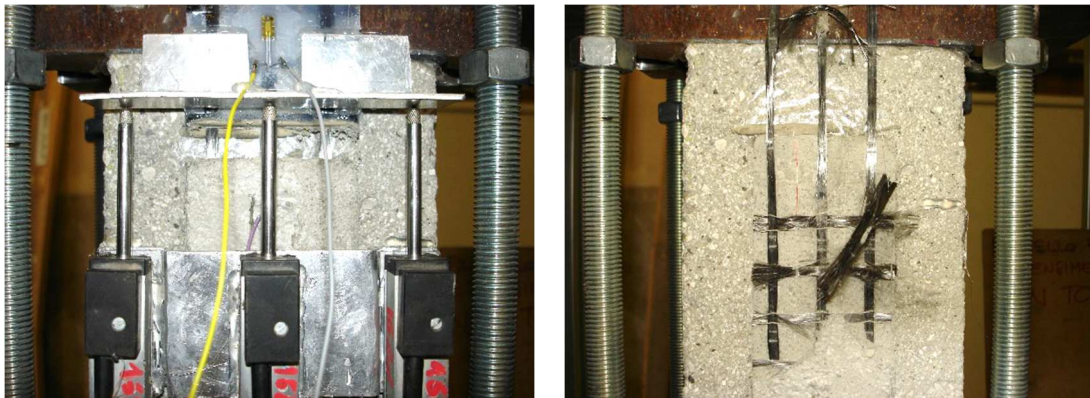


Fig. 6.25 - Esito della prova di taglio diretto. Particolare del distacco dello strato superiore della matrice.

Nonostante lo scorrimento dei fasci, l'accumulo di fibre nella parte inferiore della matrice porta a considerare la presenza di un effetto telescopico nella rottura (Fig. 6.26).



Fig. 6.26 – Particolare delle fibre non delaminate nella parte inferiore della matrice.

In Tab 6.5 sono riportati i valori delle deformazioni relative ai carichi scelti per l'analisi, indicati in Fig. 6.24 con delle lettere lungo la curva di risposta del provino.

Lo strain gauge SG1 è applicato al di fuori del composito FRCM, direttamente sulla resina ed in prossimità della matrice, in linea con il fascio centrale. Il valore in mm indicato a fianco dell'identificativo di ogni strain gauge rappresenta la coordinata del punto di applicazione secondo il sistema di assi di Fig. 5.11.

I valori delle deformazioni rilevati, sono stati elaborati per via grafica (Fig. 6.27) riportando in ordinata le deformazioni in microstrain ed in ascissa la coordinata del punto di applicazione.

	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Deformazioni strain gauges [ $\mu\epsilon$ ]					
			SG1 (490 mm)	SG2 (450 mm)	SG3 (430 mm)	SG4 (350 mm)	SG5 (230 mm)	SG6 (90 mm)
P*	1,540	1,203	2751	2796	3523	3575	2197	591
A	0,504	0,008	1337	586	1437	671	27	2
B	0,801	0,227	1821	1082	1953	1391	573	3
C	1,082	0,437	2205	1562	2422	2001	1262	27
D	1,360	1,500	2644	2801	3489	3675	1951	397
E	0,868	2,250	2095	1686	2314	2703	648	-317
F	0,687	4,861	1918	1954	2131	2175	1553	-772

Tab. 6.5 - Valori delle deformazioni misurati per ogni valore di carico scelto.



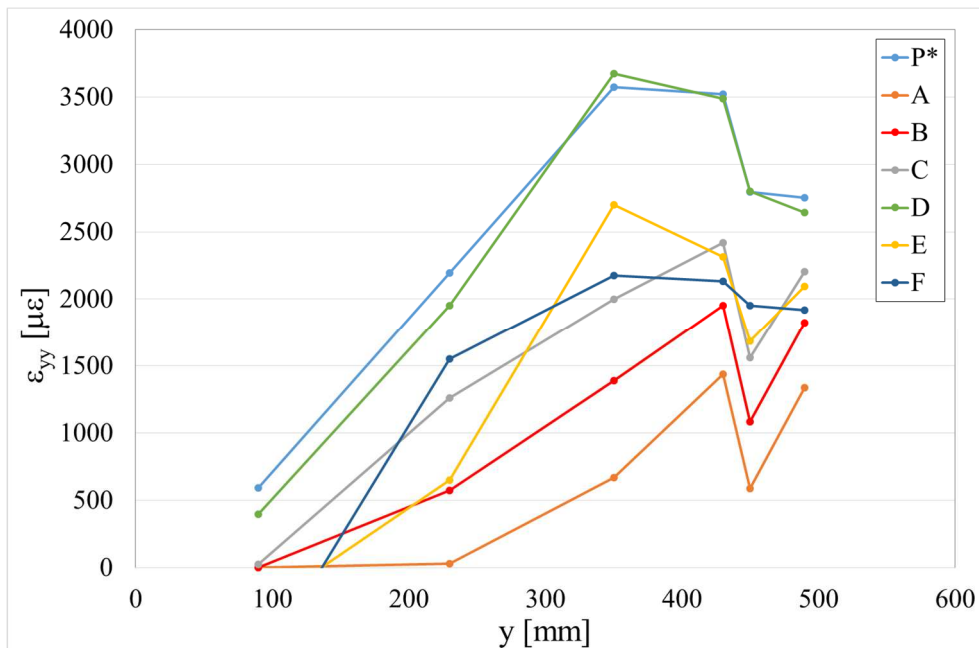


Fig. 6.27 - Grafico delle deformazioni nei punti di applicazione degli strain gauges, rilevate per diversi valori del carico applicato.

### 6.4 CURVE DI FITTING: FUNZIONI CONTINUE E METODO DISCRETO

L'analisi delle deformazioni per alcuni punti sulla lunghezza di incollaggio del composito può essere utile per ricavare il legame di aderenza all'interfaccia fibra-matrice. E' necessario fare un breve confronto con la casistica di provini di composito FRP applicato su calcestruzzo.

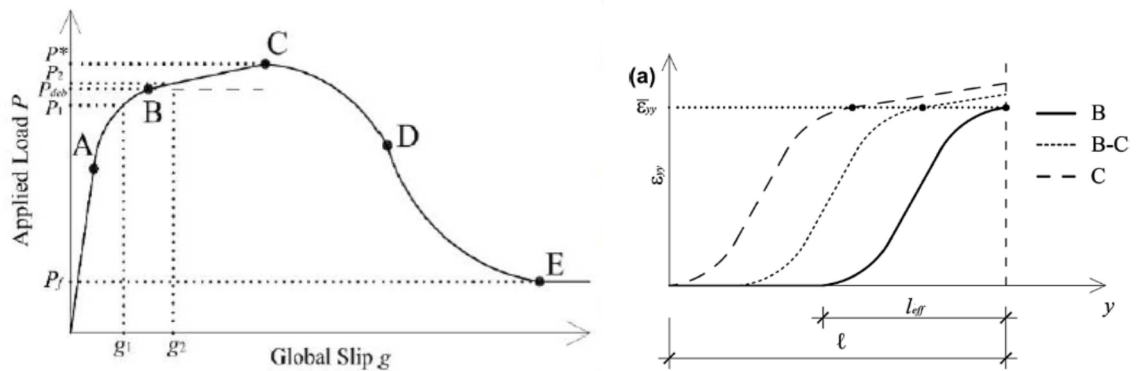


Fig. 6.28 – A sinistra, curva carico-spostamento ideale per compositi FRCM. A destra, curve di fitting del profilo delle deformazioni per alcuni valori del carico indicati nel grafico a sinistra. [4]

In Fig. 6.28, a destra sono riportate delle curve di fitting ideali che approssimano l'andamento tipico dei valori di deformazione delle fibre di rinforzo di campioni FRCM applicati su calcestruzzo, per i valori di carico indicati nel grafico di sinistra. In particolare la curva B, relativa al cosiddetto carico di debonding (cioè il carico oltre il quale si manifesta lo scorrimento dei fasci del rinforzo all'interno della matrice) interessa gli eventuali strain gauges più vicini all'estremità caricata della matrice, individuando anche la lunghezza efficace di trasmissione del carico tra substrato e matrice. Superato il valore di carico del punto B, la zona di trasferimento delle tensioni tra substrato e composito si "sposta" verso l'estremità non caricata della matrice, mentre la porzione di fibre che ha subito il distacco dalla matrice è soggetta all'attrito interfacciale, generando un aumento di resistenza visibile nel tratto lineare B-C del grafico di sinistra. La corrispondente risposta deformativa, visibile nella figura di destra con la curva a tratteggio fitto, si manifesta con una traslazione della curva precedente verso la parte non caricata della matrice, presentando un incremento lineare delle deformazioni verso la parte delle fibre soggetta a scorrimento. Il fenomeno progredisce fino al punto C, quando  $L_{eff}$  raggiunge l'estremità non caricata della matrice.

Nella figura di destra, la linea tratteggiata orizzontale indica la risposta ideale che si otterrebbe con compositi FRP applicati su calcestruzzo. In assenza di attrito, infatti, la deformazione massima raggiunta prima del distacco della matrice dal substrato, viene mantenuta fino alla fine del processo di rottura. Nel grafico di sinistra, la linea tratteggiata orizzontale con origine in B mostra la risposta carico-spostamento di compositi FRP applicati su calcestruzzo. Il carico massimo per questo tipo di compositi coincide con  $P_{deb}$ , il quale viene mantenuto pressochè costante durante la fase di distacco progressivo dal substrato.

Questa differenza di comportamento è fondamentale per poter applicare ai compositi FRCM gli stessi metodi di analisi già ampiamente usati per i compositi FRP. Volendo partire, infatti, da funzioni di fitting valide per i compositi FRP, è necessario modificarne alcune parti per ottenere un andamento che approssimi quello tipico della risposta deformativa.

Una funzione generale adatta ai compositi FRP è proposta da Dai et al. [14] e mette in relazione la deformazione  $\epsilon$  e lo spostamento  $s$ . (Altre proposte in letteratura sono fornite da [15] ÷ [21]).

$$\epsilon = f(s) = A(1 - e^{-Bs})$$

(Eq. 1)

Il grafico della funzione è rappresentato in Fig. 6.29 per valori imposti di  $A = 1,2$  e  $B = 3$ . L'andamento rispecchia esattamente quanto descritto in precedenza per le deformazioni dei compositi FRP.

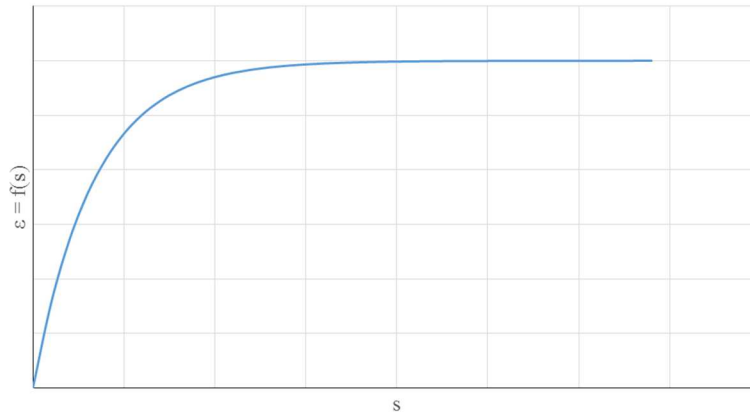


Fig. 6.29 – Grafico della funzione proposta in [14] (Eq. 1).

Definita la funzione di fitting per i valori di deformazione misurati dagli strain gauges in prossimità del punto B (Fig. 6.28), essendo valida la relazione:

$$\tau = E_f t_f \cdot \frac{d\varepsilon}{dx} = E_f t_f \cdot \frac{df(s)}{ds} \cdot f(s)$$

è possibile determinare il legame di aderenza all'interfaccia fibra-matrice mediante:

$$\tau(s) = A^2 B E_f t_f e^{-Bs} (1 - e^{-Bs}) \quad (Eq. 2)$$

dove  $E_f t_f$  è il prodotto tra modulo elastico e spessore del composito FRP.

Il grafico della funzione è rappresentato in Fig. 6.30 per valori imposti di  $A = 1,2$ ,  $B = 2$ ,  $E_f = 1$ ,  $t_f = 2$ . L'area sottesa dalla curva della funzione rappresenta l'energia di frattura  $G$ .

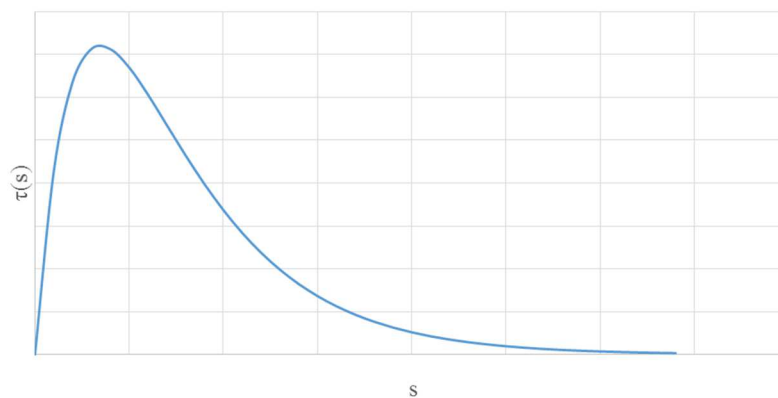


Fig. 6.30 - Grafico della funzione proposta in [14] (Eq. 2).

Utilizzando L'Eq. 1 e volendo ottenere l'andamento caratteristico delle deformazioni visto in Fig. 6.28 per i compositi FRCM in presenza di attrito, l'equazione dovrebbe essere modificata per ottenere un asintoto obliquo. Un esempio è proposto in Eq. 3.

$$\varepsilon = f(s) = A(1 - e^{-Bs}) + ks \quad (\text{Eq. 3})$$

Il grafico della funzione è rappresentato in Fig. 6.31 per valori imposti di  $A = 1,2$ ,  $B = 3$  e  $k = 0,5$ .

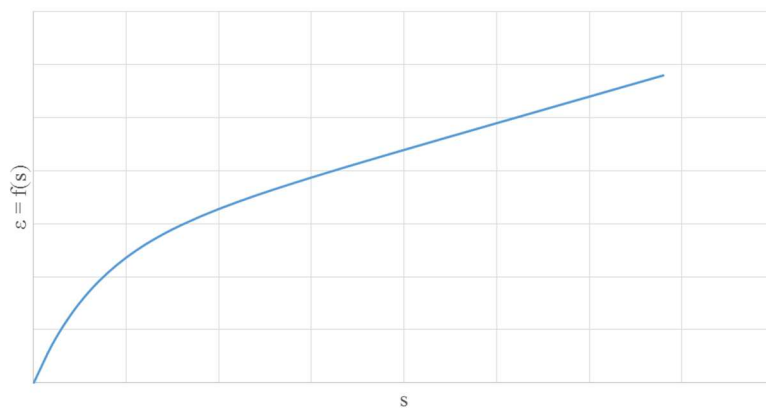


Fig. 6.31 - Grafico della funzione Eq. 3.

Applicando la relazione vista in precedenza, l'equazione che descrive il legame di aderenza all'interfaccia fibra-matrice risulta:

$$\tau(s) = A^2 B E_f t_f e^{-Bs} (1 - e^{-Bs}) + k \quad (\text{Eq. 4})$$

il cui grafico è visibile in Fig. 6.32 per valori imposti di  $A = 1,2$ ,  $B = 3$ ,  $E_f = 1$ ,  $t_f = 2$ ,  $k = 1$ .

L'Eq. 4 alla fine del ramo decrescente presenta un andamento costante, che descrive la presenza del solo attrito quando si ha la completa assenza di superficie di trasferimento tra matrice cementizia e substrato. La curva però non passa per l'origine del grafico, presentando un valore di ordinata  $k$  per spostamenti nulli. Nella realtà ciò non è possibile, quindi si propone una formulazione del tipo " $s \cdot \tau_f / (k + s)$ " in sostituzione del termine  $k$  in Eq. 4, che permette di mantenere il tratto costante parallelo all'asse delle ascisse e consente alla curva di passare per l'origine degli assi. L'integrazione di Eq. 4 permette di ottenere la funzione di deformazione  $\varepsilon(s)$ .

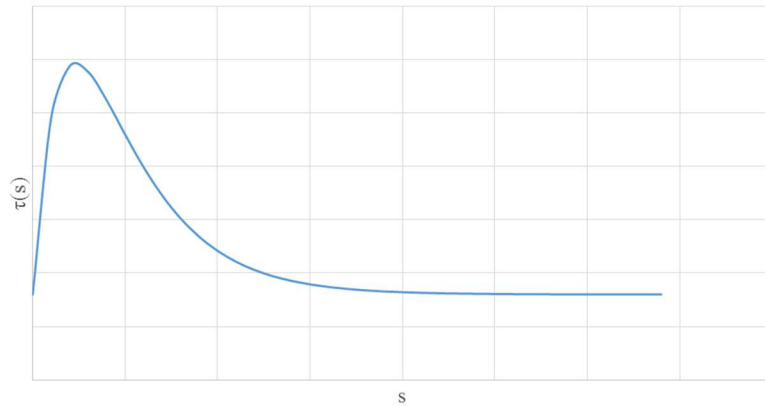


Fig. 6.32 - Grafico della funzione Eq. 4.

E' possibile inoltre utilizzare un approccio discreto per l'interpolazione dei punti del grafico delle deformazioni ottenute dagli strain gauges, utilizzando i segmenti che congiungono i punti del grafico anziché le funzioni di interpolazione. In questo caso, il valore della tensione di taglio sarà determinato dalla pendenza di ogni segmento (derivazione nel caso della funzione), mentre il valore dello spostamento sarà una sommatoria delle aree del grafico sottese da ogni segmento (integrazione nel caso della funzione).

$$\tau_{zy}(y_p) = \frac{1}{4} t^* E [(\varepsilon_{p-1} - \varepsilon_p)/(y_{p-1} - y_p) + (\varepsilon_p - \varepsilon_{p+1})/(y_p - y_{p+1})]$$

$$s(y_p) = \sum_{q=p}^N \frac{1}{2} (\varepsilon_q + \varepsilon_{q+1})(y_q - y_{q+1})$$

Le equazioni riportate [4] permettono di determinare i valori della tensione di taglio e lo spostamento nei punti di applicazione degli strain gauges, individuati con la rispettiva coordinata secondo Fig. 5.11.  $y_p$  è il p-esimo strain gauge,  $\varepsilon_p$  è la corrispondente deformazione misurata ed N rappresenta il numero dei dispositivi applicati alla fibra.

Volendo applicare questo metodo alle deformazioni ottenute per il campione DS\_CS17\_450\_60\_S\_1, è necessario individuare il valore del punto B di Fig. 6.28 nel grafico della risposta carico-spostamento del provino in esame (Fig. 6.16). L'operazione non è semplice, poiché l'inizio del tratto a pendenza costante non è così evidente. E' stata fatta una scelta sulla base di un improvviso calo della curva del grafico, che si pensa sia dovuto al manifestarsi del primo distacco delle fibre dalla matrice. Sono stati individuati due punti nell'intorno di quello precedentemente stabilito, al fine di mediare i valori finali.

La Fig. 6.33 riporta un dettaglio dei tre punti scelti per indagare il profilo delle deformazioni.

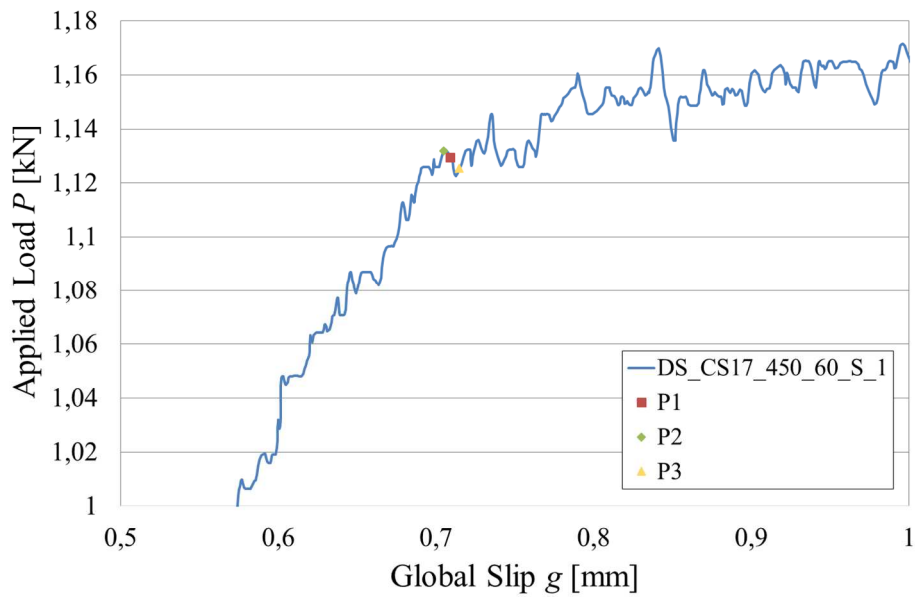


Fig. 6.33 – Dettaglio della risposta di carico del provino DS\_CS17\_450\_60\_S\_1.

I punti scelti hanno coordinate (s;P): P1 (0,708925;1,129604), P2 (0,704895;1,131844), P3 (0,714740;1,125464). P1 è il punto centrale, P2 a sinistra e P3 a destra. I profili delle deformazioni per i tre carichi stabiliti sono mostrati in Fig. 6.34.

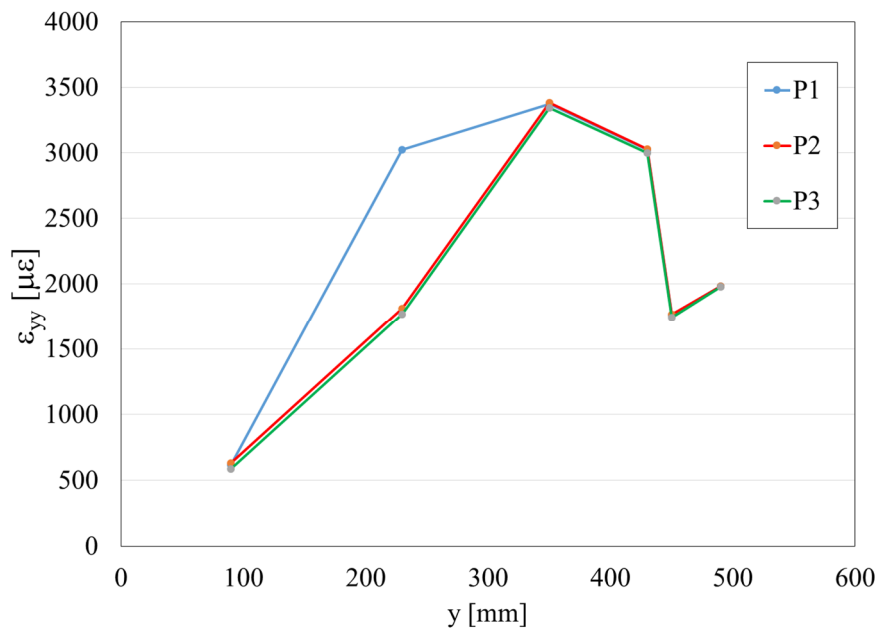


Fig. 6.34 – Profili deformativi in corrispondenza dei carichi applicati P1, P2, P3.

Il valore dello strain gauge applicato all'esterno della matrice non va considerato ( $y=490$  mm).

Ancor prima di applicare le formule per il calcolo di  $\tau$  ed  $s$ , si intuisce che i segmenti nel tratto 350-450 mm, con pendenza negativa, darebbero come risultato delle tensioni di taglio dello stesso segno. Poiché ciò non è possibile, il metodo non può essere utilizzato. Si nota infatti un andamento anomalo rispetto a quello generalmente ottenuto per compositi FRCM. Ben due dei dispositivi più vicini all'estremità caricata del provino hanno fatto registrare valori di deformazione inferiori a quelli ottenuti da strain gauges più lontani dall'effetto del carico. Si pensa che ci sia stata un'interazione meccanica tra lo strain gauge e lo strato superiore della matrice, che ha causato una anomala rilevazione delle deformazioni. Una risposta deformativa vicina a quella ideale è visibile in Fig. 6.35, ottenuta in un sperimentazione precedente [4].

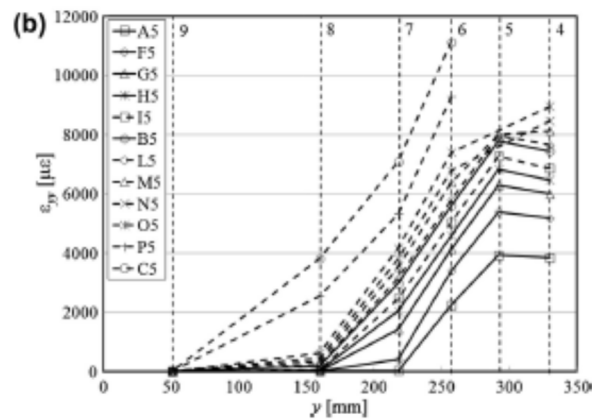


Fig. 6.35 – Risposta deformativa ottenuta da un provino FRCM in una precedente sperimentazione. [4]

## 6.5 COMPOSITI FRCM RINFORZATI CON G-NET 251BA

### 6.5.1 SERIE DS\_GS25\_100\_55

I provini appartenenti a questa serie sono stati confezionati con malta Concrete Rock S per la matrice e fibra di vetro tipo G-NET 251BA come rinforzo. La parte esterna delle fibre è stata impregnata con resina epossidica bicomponente Resin 75, incorporando nel getto anche le piastre di alluminio di ancoraggio alla macchina di prova. La lunghezza di applicazione del composito è di 100 mm e la larghezza di 55 mm.

I carichi massimi raggiunti per questa serie di provini sono stati rispettivamente 0,476 kN, 0,803 kN, 0,634 kN e 0,632 kN. Il campione DS\_GS25\_100\_55\_4 di recupero, preparato durante la terza campagna di prove, sostituisce il DS\_GS25\_100\_55\_1 che non ha dato risultati soddisfacenti. La Fig. 6.36 mostra la risposta di carico dei quattro provini testati.

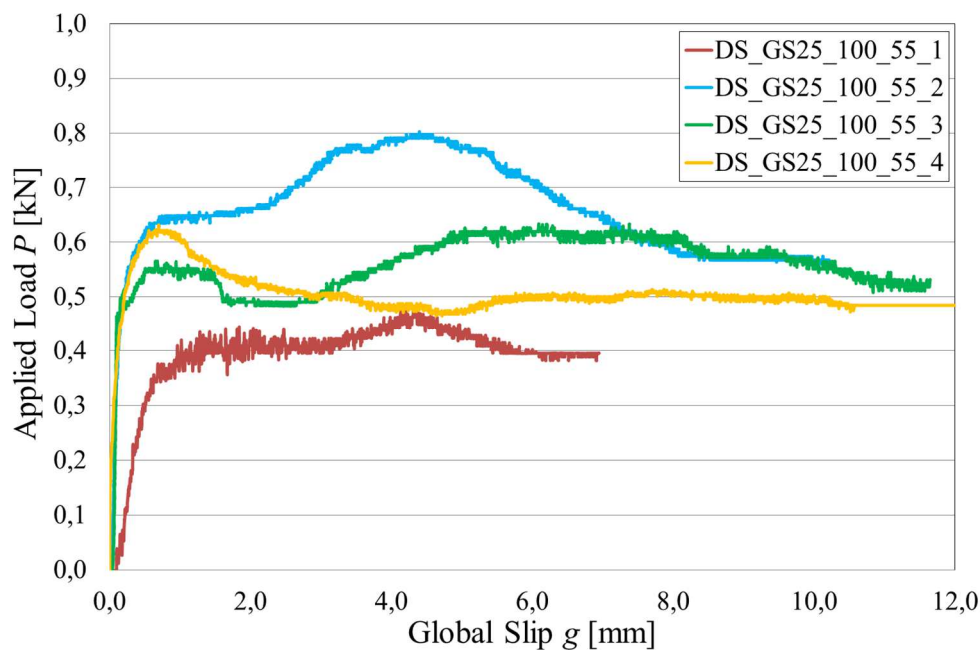


Fig. 6.36 - Risposta di carico dei provini della serie DS\_GS25\_100\_55.

Osservando il grafico, la risposta di carico non segue l'andamento ideale di Fig. 6.20 a), ma raggiunge un sorta di valore di picco e, mantenendolo pressochè costante, si verifica uno scorrimento delle fibre all'interno della matrice.



Le principali modalità di rottura sono mostrate nelle immagini in Fig. 6.37 e Fig. 6.38. E' interessante notare che per lunghezze di applicazione contenute, la rottura avviene per delaminazione delle fibre senza danno apparente alla matrice o distacco dal prisma di calcestruzzo. La stessa modalità si verifica anche con lunghezze analoghe di applicazione con rinforzo in fibra di carbonio. Lo scorrimento delle fibre è ben visibile in Fig. 6.38.

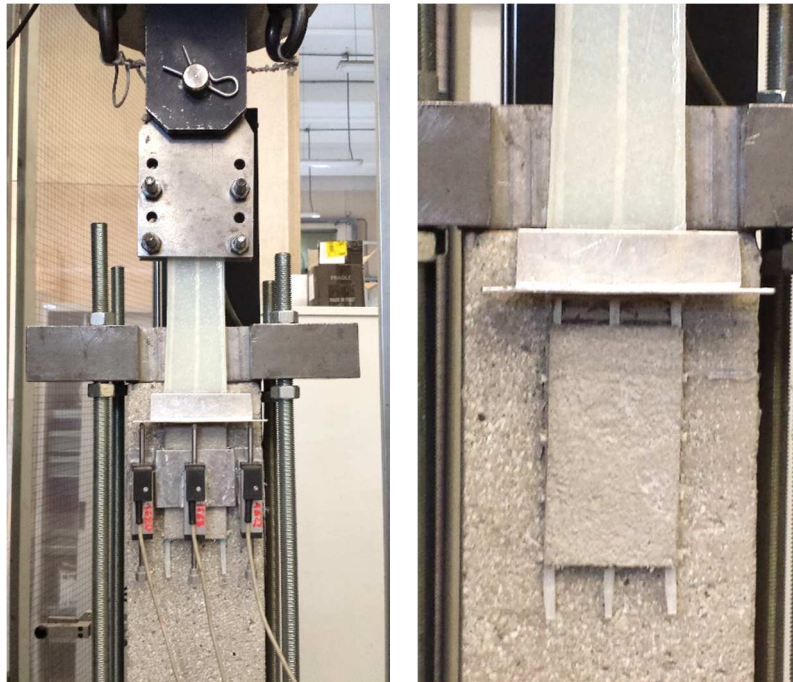


Fig. 6.37 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_GS25\_100\_55\_2.



Fig. 6.38 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_GS25\_100\_55\_4.

## 6.5.2 SERIE DS\_GS25\_200\_55

I provini appartenenti a questa serie sono stati confezionati con malta Concrete Rock S per la matrice e fibra di vetro tipo G-NET 251BA come rinforzo. La parte esterna delle fibre è stata impregnata con resina epossidica bicomponente Resin 75, incorporando nel getto anche le piastre di alluminio di ancoraggio alla macchina di prova. La lunghezza di applicazione del composito è di 200 mm e la larghezza di 55 mm.

I carichi massimi raggiunti per questa serie di provini sono stati rispettivamente 0,668 kN, 1,245 kN, 1,031 kN e 1,261 kN. Il campione DS\_GS25\_200\_55\_4 di recupero, preparato durante la terza campagna di prove, sostituisce il DS\_GS25\_200\_55\_1 che non ha dato risultati soddisfacenti. La Fig. 6.39 mostra la risposta di carico dei quattro provini testati.

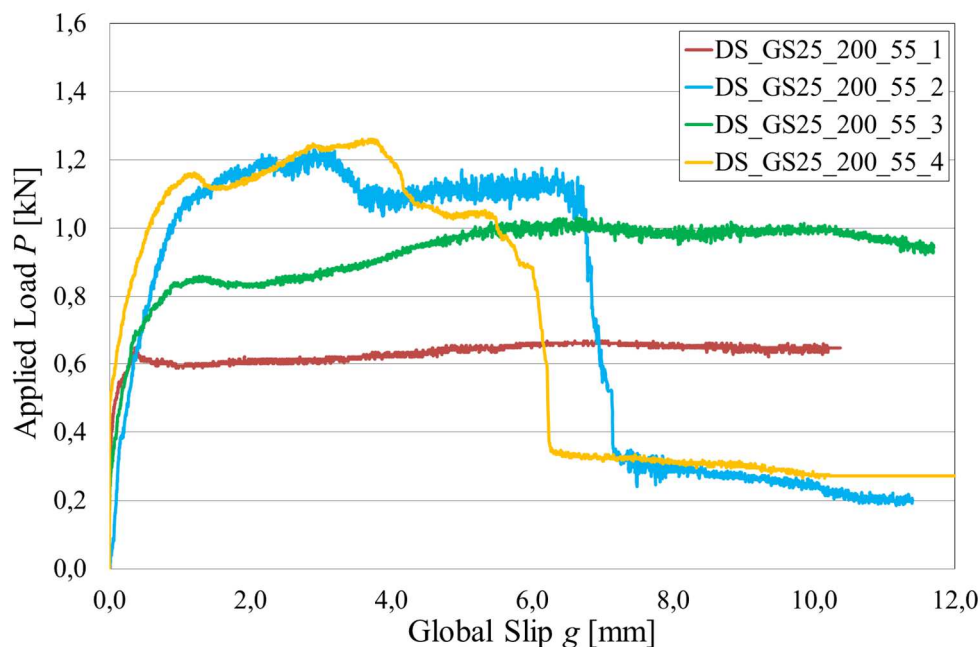


Fig. 6.39 - Risposta di carico dei provini della serie DS\_GS25\_200\_55.

In questa serie di prove si notano le prime differenze in termini di risposta di carico rispetto a quelle descritte in precedenza. I provini DS\_GS25\_200\_55\_1 e DS\_GS25\_200\_55\_3 mostrano un comportamento analogo a quelli della serie precedente, mentre il DS\_GS25\_200\_55\_2 e DS\_GS25\_200\_55\_4 presentano una brusca caduta di carico tra i 6 e 7 mm di spostamento. Questo fenomeno è imputabile alla rottura di alcuni fasci, in particolare quelli centrali, con scorrimento di quelli di estremità. Il provino DS\_GS25\_200\_55\_3 che non ha presentato rottura di alcun fascio, mostra una risposta di carico compatibile con il comportamento dei provini di dimensione inferiore, per i quali si era verificato il solo scorrimento della fibra.



Fig. 6.40 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_GS25\_200\_55\_2.

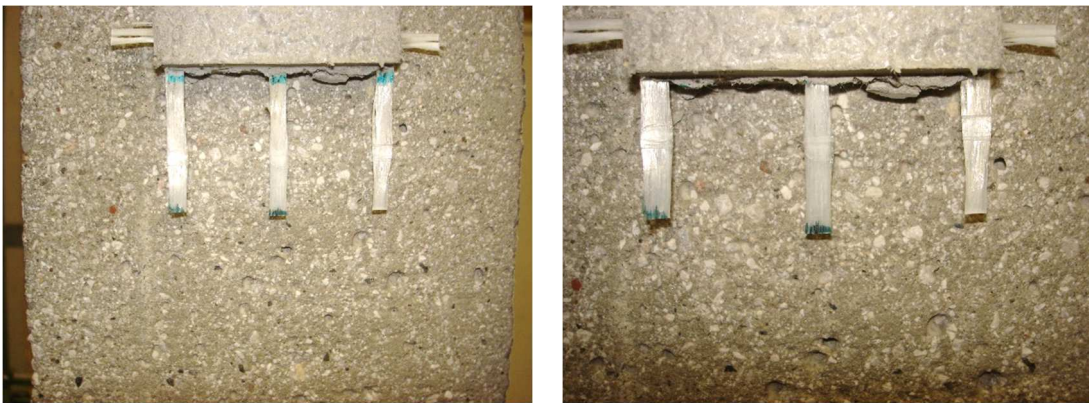


Fig. 6.41 Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_GS25\_200\_55\_3.

Nel campione DS\_GS25\_200\_55\_4 si individua una rottura tra la matrice e la resina. Il dettaglio della fibra mostra la presenza di uno sfilacciamento del fascio centrale avvenuto perlopiù all'interno della resina di rivestimento.



Fig. 6.42 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_GS25\_200\_55\_4.

### 6.5.3 SERIE DS\_GS25\_330\_55

I provini appartenenti a questa serie sono stati confezionati con malta Concrete Rock S per la matrice e fibra di vetro tipo G-NET 251BA come rinforzo. La parte esterna delle fibre è stata impregnata con resina epossidica bicomponente Resin 75, incorporando nel getto anche le piastre di alluminio di ancoraggio alla macchina di prova. La lunghezza di applicazione del composito è di 330 mm e la larghezza di 55 mm.

I carichi massimi raggiunti per questa serie di provini sono stati rispettivamente 1,759 kN, 1,714 kN e 1,984 kN. La Fig. 6.43 mostra la risposta di carico dei tre provini testati.

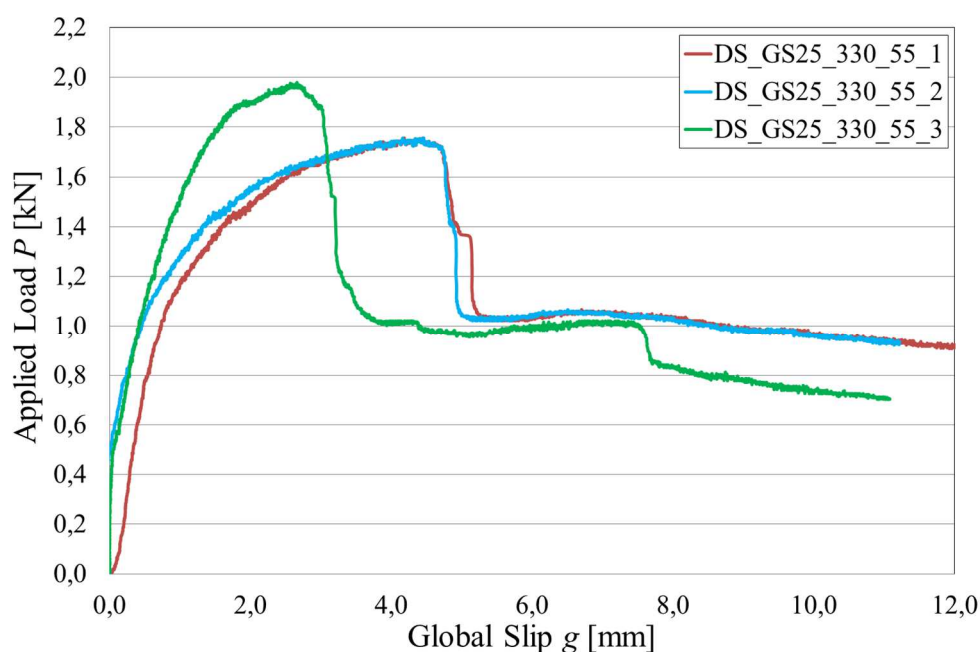


Fig. 6.43 - Risposta di carico dei provini della serie DS\_GS25\_330\_55.

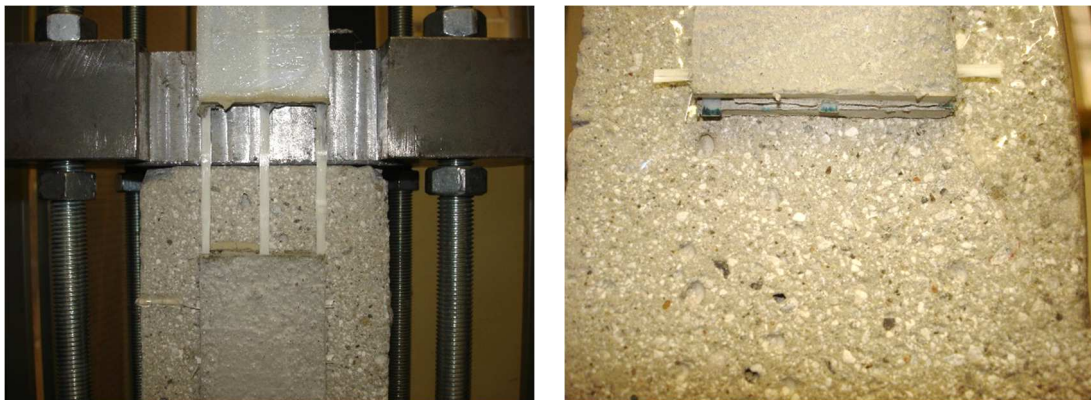
La risposta di carico dei provini di questa serie evidenzia in modo più marcato la caduta di carico intorno ad un valore di spostamento tra i 3 e 5 mm. Questo fenomeno è chiaramente connesso alla rottura delle fibre durante i test.

Di seguito vengono mostrati gli effetti della prova di taglio diretto sui 3 campioni in esame. Risulta evidente che per DS\_GS25\_330\_55\_1 e DS\_GS25\_330\_55\_3, la rottura è avvenuta nel fascio centrale. Il provino DS\_GS25\_330\_55\_2 ha avuto un comportamento anomalo, poiché dopo un palese cedimento delle fibre evidenziato dal grafico, la prosecuzione della prova ha fatto sì che la fibra continuasse a scorrere all'interno della matrice.

Nel dettaglio di Fig. 6.46 è evidenziata la rottura del fascio centrale, avvenuta all'interno della resina che impregnava le fibre.



*Fig. 6.44 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_GS25\_330\_55\_1.*



*Fig. 6.45 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_GS25\_330\_55\_2.*



*Fig. 6.46 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_GS25\_330\_55\_3.*

#### 6.5.4 SERIE DS\_GS25\_450\_55

I provini appartenenti a questa serie sono stati confezionati con malta Concrete Rock S per la matrice e fibra di vetro tipo G-NET 251BA come rinforzo. La parte esterna delle fibre è stata impregnata con resina epossidica bicomponente Resin 75, incorporando nel getto anche le piastre di alluminio di ancoraggio alla macchina di prova. La lunghezza di applicazione del composito è di 450 mm e la larghezza di 55 mm.

I carichi massimi raggiunti per questa serie di provini sono stati rispettivamente 2,070 kN, 2,044 kN e 2,363 kN. La Fig. 6.47 mostra la risposta di carico dei tre provini testati. E' stato necessario mostrare nel grafico anche gli spostamenti negativi poichè, durante la fase iniziale della prova, il probabile leggero disassamento tra provino e carico applicato dalla macchina potrebbe aver indotto una leggera rotazione dell'angolare applicato alla fibra, facendo registrare agli LVDT uno spostamento negativo.

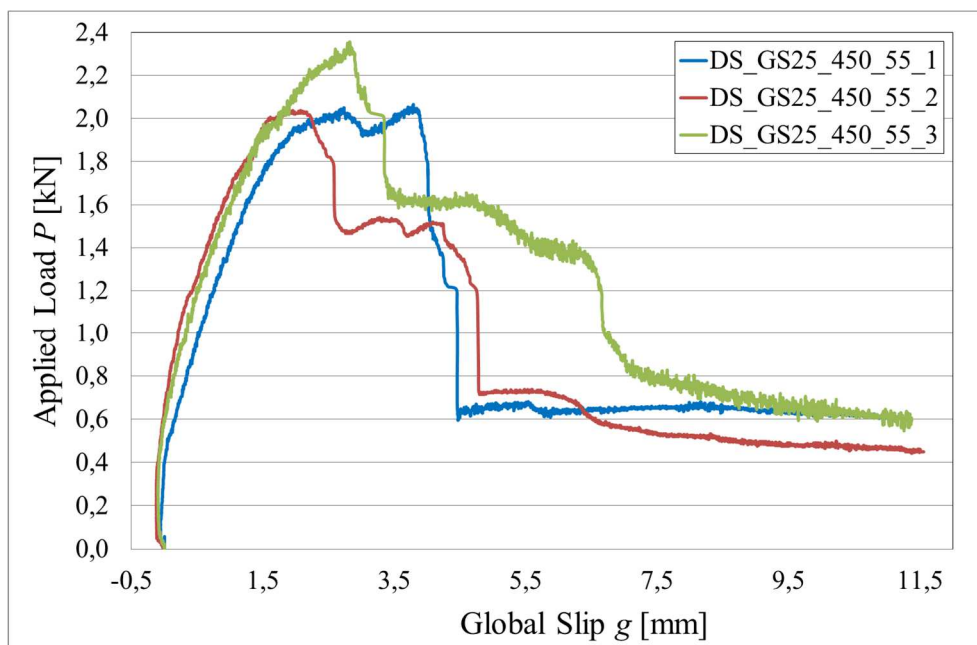


Fig. 6.47 - Risposta di carico dei provini della serie DS\_GS25\_450\_55.

Per questa serie di provini si notano cadute di carico marcate ma diffuse per i campioni DS\_GS25\_450\_55\_2 e DS\_GS25\_450\_55\_3, mentre per il DS\_GS25\_450\_55\_1 si ha una drastica diminuzione del carico dal punto massimo, per assestarsi al valore degli altri due provini. Queste brusche variazioni si concentrano nell'intervallo di spostamento tra 3,5 mm e 6 mm. Le Fig. 6.48, 6.49 e 6.50 mostrano il tipo di rottura caratteristico di questa serie di compositi. Il punto di criticità

è situato all'interfaccia matrice-resina. Tutti i campioni sono stati soggetti a rottura del fascio centrale ed, in particolare, i provini DS\_GS25\_450\_55\_1 e DS\_GS25\_450\_55\_2 hanno manifestato la rottura anche di uno dei fasci esterni.



Fig. 6.48 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_GS25\_450\_55\_1.



Fig. 6.49 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_GS25\_450\_55\_2.



Fig. 6.50 - Esito della prova di taglio diretto per il provino DS\_GS25\_450\_55\_3.

## 6.6 CONCLUSIONI FRCM RINFORZATI CON G-NET 251BA

La tabella seguente riporta i dati raccolti dalle prove sui campioni di compositi FRCM rinforzati con fibra di vetro G-NET 251BA.

Provino	L [mm]	P* [kN]	Avg [kN]	
DS_GS25_100_55_1	100	0,476	0,689	valore scartato
DS_GS25_100_55_2	100	0,803		
DS_GS25_100_55_3	100	0,634		
DS_GS25_100_55_4	100	0,632		
DS_GS25_200_55_1	200	0,668	1,179	valore scartato
DS_GS25_200_55_2	200	1,245		
DS_GS25_200_55_3	200	1,031		
DS_GS25_200_55_4	200	1,261		
DS_GS25_330_55_1	330	1,759	1,819	
DS_GS25_330_55_2	330	1,714		
DS_GS25_330_55_3	330	1,984		
DS_GS25_450_55_1	450	2,070	2,159	
DS_GS25_450_55_2	450	2,044		
DS_GS25_450_55_3	450	2,363		

Tab. 6.6 - Tabella riassuntiva dei carichi massimi ottenuti dalle prove di taglio diretto per i campioni di composito FRCM rinforzati con G-NET 251BA.

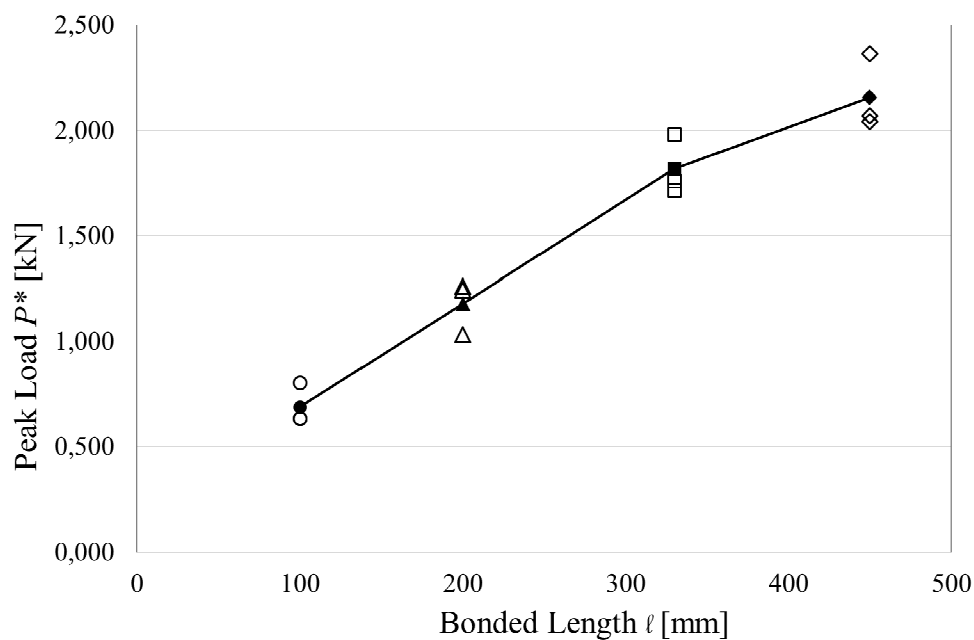


Fig. 6.51 - Grafico carico applicato-lunghezza di incollaggio per G-NET 251BA (length effect).



Scartando i valori troppo distanti dall'andamento generale, è stata calcolata la media dei carichi di picco  $P^*$  ottenuti in ogni serie, ovvero per ogni lunghezza di applicazione (L). Ad ogni valore medio è stata associata la lunghezza a cui si riferisce, ed il tutto è stato elaborato in un grafico con una spezzata che congiunge i valori medi al variare della lunghezza (Fig. 6.51).

Per ogni valore di carico massimo  $P^*$  ottenuto dalle prove è stata poi ricavata la tensione normale  $\sigma^*$  raggiunta dalle fibre (Tab. 6.7), utilizzando la formula seguente:

$$\sigma^* = \frac{P^*}{n \cdot A_{fascio}}$$

dove  $P^*$  è il carico di picco,  $n$  è il numero di fasci presenti nel composito (valore che in questa sperimentazione è sempre pari a 3) e  $A_{fascio}$  rappresenta la sezione effettiva del singolo fascio di fibre. Per il calcolo della sezione della fibra si veda il paragrafo 4.3.1.

Provino	Lunghezza [mm]	$P^*$ [kN]	$\sigma^*$ [MPa]	Coefficiente di sfruttamento	
DS_GS25_100_55_1	100	0,476	127	0,18	valore scartato
DS_GS25_100_55_2	100	0,803	214	0,30	
DS_GS25_100_55_3	100	0,634	169	0,24	
DS_GS25_100_55_4	100	0,632	168	0,23	
DS_GS25_200_55_1	200	0,668	178	0,25	valore scartato
DS_GS25_200_55_2	200	1,245	332	0,46	
DS_GS25_200_55_3	200	1,031	275	0,38	
DS_GS25_200_55_4	200	1,261	336	0,47	
DS_GS25_330_55_1	330	1,759	469	0,65	
DS_GS25_330_55_2	330	1,714	457	0,64	
DS_GS25_330_55_3	330	1,984	529	0,74	
DS_GS25_450_55_1	450	2,070	552	0,77	
DS_GS25_450_55_2	450	2,044	545	0,76	
DS_GS25_450_55_3	450	2,363	630	0,88	

Tab. 6.7 - Tabella riassuntiva dei carichi massimi di ogni provino e delle relative tensioni, rapportate alla resistenza media a trazione della fibra G-NET 251BA.

Il coefficiente di sfruttamento in Tab. 6.7 è ricavato dal rapporto tra la tensione massima raggiunta dai fasci del rinforzo nelle prove di taglio diretto e quella raggiunta dalla fibra durante il test di trazione su singolo fascio. Il valore risulta indicativo in quanto è possibile capire quanto la fibra, in termini tensionali, sia sfruttata nel meccanismo resistente di aderenza nel composito FRCM testato. In questo gruppo di prove, in cui si è testato il composito rinforzato con la fibra di vetro G-NET 251BA, si ottengono valori nettamente superiori a quelli ricavati nei test sul carbonio. Questo indica che per le lunghezze di aderenza più elevate, il vetro è sottoposto a tensioni prossime a quelle

di rottura. In una configurazione di sollecitazione elevata, risulta quindi più influente l'eventuale non omogenea distribuzione del carico applicato tra i fasci longitudinali all'interno della matrice. La documentazione fotografica riportata nelle pagine precedenti ha dimostrato la rottura di due dei tre fasci per alcuni campioni, indice che alcune fibre hanno raggiunto e superato un coefficiente di sfruttamento pari a 1. Va sottolineato che i valori riportati in tabella sono il frutto di una teorica perfetta suddivisione del carico per i tre fasci. Un'analisi più approfondita richiederebbe un'indagine delle deformazioni dei tre fasci contemporaneamente, per capire i meccanismi di redistribuzione del carico applicato.

## 7. CONCLUSIONI

### 7.1 CONSIDERAZIONI FINALI

Nel presente documento è stata descritta una sperimentazione condotta su materiali compositi fibrorinforzati a matrice cementizia (FRCM) applicati su calcestruzzo. Dopo una prima parte di approfondimento teorico ha fatto seguito una descrizione delle esperienze dirette di laboratorio.

Sono state condotte 31 prove di taglio diretto singolo su provini con rinforzo in fibra di vetro e carbonio, con diverse lunghezze di incollaggio del composito, al fine di indagare i meccanismi di rottura e di trasferimento delle tensioni tra composito e substrato di calcestruzzo. I risultati ottenuti sono riassunti di seguito.

I compositi rinforzati con rete in fibra di carbonio C-NET 170BL sono giunti a rottura per delaminazione della fibra dalla matrice, caratterizzata da un progressivo scorrimento dei fasci longitudinali. In nessun caso si è osservato un danno all'interfaccia matrice-substrato di calcestruzzo. Le curve di risposta hanno mostrato, per tutti i campioni, un ramo crescente ed uno decrescente molto ripidi. Il contributo di attrito durante lo scorrimento delle fibre, dipendente dalla lunghezza di incollaggio, ha portato ad avere carichi di picco maggiori all'aumentare della lunghezza del composito, con conseguente aumento della tensione di esercizio della fibra del rinforzo. Il coefficiente di sfruttamento delle fibre C-NET 170BL si è attestato ad un valore massimo del 52%. E' stato osservato il cosiddetto comportamento telescopico delle fibre durante la delaminazione, sintomo di una non completa impregnazione della matrice fino al nucleo dei fasci immersi in essa. I provini di lunghezza 200 mm sono stati gli unici a presentare una rottura dello strato superiore della matrice.

I campioni della serie DS\_CS17\_450\_60\_S, dotati di strain gauges lungo il fascio centrale, hanno presentato in due casi una rottura dello strato superiore della matrice, dovuta probabilmente all'interazione meccanica con gli strumenti applicati alle fibre. Si ipotizza che questo abbia avuto effetti anche sulla misura delle deformazioni per gli strain gauges più vicini all'estremità caricata del composito, facendo registrare valori non conformi a quelli attesi.

I compositi rinforzati con rete in fibra di vetro G-NET 251BA sono giunti a rottura con modalità diverse. E' stato possibile osservare una rottura per delaminazione nei campioni di lunghezza 100 mm, il cui grafico di risposta ha presentato delle curve con ramo crescente e successivo mantenimento del carico quasi costante. I campioni di lunghezza superiore hanno manifestato rottura di uno o due fasci contemporaneamente, con zona critica localizzata all'interfaccia matrice-resina o all'interno della matrice stessa. In questo caso le curve di risposta hanno registrato delle importanti cadute di carico in corrispondenza della rottura dei fasci. L'aderenza tra Concrete Rock S e fibre di vetro G-NET 251BA si è dimostrata migliore rispetto alle fibre di carbonio, con un coefficiente di sfruttamento che si è attestato ad un valore massimo di 88%. In questo caso, una non perfetta distribuzione del carico applicato tra i fasci verticali, può essere stata particolarmente influente nella rottura. In genere si è registrato un carico di picco maggiore all'aumentare della lunghezza di incollaggio e non si è notato alcun effetto telescopico, probabilmente grazie al trattamento di apprettatura delle fibre.

## **7.2 SPERIMENTAZIONI FUTURE**

Lo studio descritto in questo documento si propone come strumento a supporto di sperimentazioni future, sia per i dati ottenuti sui materiali, sia per il set up di prova, che non ha fatto registrare aspetti negativi che influissero sui dati ottenuti.

Poiché il meccanismo di rottura ha interessato l'interfaccia fibra-matrice, si consiglia in futuro di indagare il ruolo dello strato superiore della matrice per l'aderenza con le fibre, oltre che uno studio sui meccanismi di ripartizione del carico tra i fasci longitudinali del rinforzo del composito.





---

## BIBLIOGRAFIA

- [1] CNR-DT 200, 2004  
“Istruzioni per la progettazione, l’esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l’utilizzo di compositi fibrorinforzati”
- [2] UNI EN 1015-11, 2007  
“Metodi di prova per malte per opere murarie – Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione della malta indurita”
- [3] UNI EN 12190, 2000  
“Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Metodi di prova: Determinazione della resistenza a compressione delle malte da riparazione”
- [4] T. D’Antino, C. Carloni, L.H. Sneed, C. Pellegrino – “Matrix-fiber bond behavior in PBO FRCM composites: A fracture mechanics approach” *Engineering fracture mechanics*, Missouri University of Science and Technology, 2014
- [5] ASTM D3039  
“Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials”
- [6] L.H. Sneed, T. D’Antino, C. Carloni – “Investigation of bond behavior of PBO fiber-reinforced cementitious matrix composite-concrete interface” Missouri University of Science and Technology, 2014
- [7] T. D’Antino, C. Pellegrino, C. Carloni, L.H. Sneed, G. Giacomini – “Experimental analysis of the bond behavior of glass, carbon, and steel FRCM composites” University of Padova, Italy, 2014
- [8] T. D’Antino – “Bond behavior in fiber reinforced polymer composites and fiber reinforced cementitious matrix” PhD Thesis Università di Padova, 2014
- [9] F. Soldera – “Caratterizzazione meccanica di materiali compositi a matrice cementizia per mezzo di prove di taglio diretto” Tesi di Laurea Università degli Studi di Padova, A.A. 2013-2014

- [10] UNI EN 15422, 2008  
“Prodotti prefabbricati per calcestruzzo – Specifica per le fibre di vetro per l’armatura di malte e calcestruzzi”
- [11] L. Sagrito – “Analisi sperimentale degli effetti di temperature elevate sul comportamento strutturale dei rinforzi FRP” Tesi di laurea, A.A. 2006-2007
- [12] V. Alvaro – “Materiali compositi a matrice cementizia per i rinforzi strutturali” Tesi di Laurea Università degli Studi di Bologna, A.A. 2006-2007
- [13] P. Spiezia – “I materiali compositi fibrorinforzati nel recupero degli edifici storici” Tesi di dottorato Università degli Studi di Napoli, 2005
- [14] J. Dai, T. Ueda, Y. Sato – “Unified analytical approaches for determining shear bond characteristics of FRP-concrete interfaces through pullout tests”, *Journal of advanced concrete technology* vol. 4, 2006
- [15] A. D’Ambrisi, L. Feo, F. Focacci – “Bond-slip relations for PBO-FRCM materials externally bonded to concrete”, *Composites: Part B*, 2012
- [16] B. Ferracuti, M. Savoia, C. Mazzotti – “Interface law for FRP–concrete delamination”, 2006
- [17] A. Hosseini, D. Mostofinejad – Effective bond length of FRP-to-concrete adhesively-bonded joints: Experimental evaluation of existing models, 2013
- [18] H. Yuan, J. G. Teng, R. Seracino, Z. S. Wu, J. Yao – “Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints”, *Engineering structures* 26, 2004
- [19] H. Toutanji, S. Ueno, R. Vuddandam – “Prediction of the interfacial shear stress of externally bonded FRP to concrete substrate using critical stress state criterion”, 2013
- [20] J. Pan, Y. F. Wu – “Analytical modeling of bond behavior between FRP plate and concrete”, 2014
- [21] B. Ferracuti, M. Savoia, C. Mazzotti – “An experimental study on delamination of FRP plates bonded to concrete”, 2007



# **APPENDICE**



## ALLEGATO 1

# CONCRETE ROCK S

Sch. Tec. FS37  
**LINEA  
FRP SYSTEM**  
Consolidamento  
strutturale



## Malta monocomponente tixotropica fibrorinforzata a ritiro compensato e reattività pozzolanica per ripristini strutturali

### Descrizione

CONCRETE ROCK S è una malta monocomponente tixotropica premiscelata a base di leganti inorganici ad alta resistenza, a reattività pozzolanica con leganti polimerici ed aggregati selezionati, fibrorinforzata, pronta all'uso, da mescolare con acqua, per ottenere impasti non segregabili, tixotropici, a ritiro compensato.

CONCRETE ROCK S è in classe R2 ai sensi della EN 1504-3, sviluppa alte resistenze meccaniche, è impermeabile, durevole anche in ambienti aggressivi, garantisce un'elevata adesione alle murature. CONCRETE ROCK S non contiene parti metalliche, alluminio e cloruri.

### Campi d'impiego

CONCRETE ROCK S è formulato appositamente per effettuare opere di manutenzione, di ripristino strutturale e di restauro in aree industriali, urbane e marine ove le forti concentrazioni di agenti aggressivi causano nel tempo il deterioramento delle murature.

CONCRETE ROCK S trova particolare applicazione in:

- Opere di restauro di murature
- Riparazione di strutture murarie orizzontali e verticali
- Realizzazione di intonaci strutturali armati con reti e tessuti in acciaio, fibre in vetro e sintetiche.

### Vantaggi

CONCRETE ROCK S è di facile miscelazione e posa in opera; si applica a cazzuola o a spruzzo, in spessori fino a 3 cm. in un unico strato, con un minimo di 0,5 cm; per spessori maggiori si raccomanda di effettuare l'applicazione a strati sovrapposti.

CONCRETE ROCK S non presenta cavillature o fessurazioni da ritiro plastico come le tradizionali malte cementizie.

CONCRETE ROCK S ha un'elevata compattezza, bassa porosità capillare, ottima impermeabilità e resistenza ai cicli di gelo e disgelo, ai solfati e agli olii lubrificanti.

Le proprietà meccaniche di CONCRETE ROCK S consentono di effettuare opere di ripristino altamente affidabili e durature nel tempo, riducendo notevolmente i costi di manutenzione.

### Dati tecnici (Classe R2-UNI EN 1504-3)

Resa	ca. 1500 kg/m <sup>3</sup>
Acqua d'impasto	19% in peso sulla polvere
Tempo di lavorabilità (20°C e 65% U.R.)	> 60 min.
Contenuto ioni cloruro	< 0,05%
Resistenza a compressione a 28 g	25 N/mm <sup>2</sup> (Classe R3)
Modulo elastico a 28 g	15.000 N/mm <sup>2</sup> ca. (Classe R3)
Aderenza al mattone a 28 g	> 0,6 N/mm <sup>2</sup>
Permeabilità al vapore acqueo μ	20
Assorbimento capillare	< 0,5 kg m <sup>-2</sup> h <sup>-0,5</sup>
Reazione al fuoco EN 1015-1	classe A1
Resistenza ai cicli di gelo e disgelo	resistente
Resistenza ai solfati	nessun degrado dopo attacco in solfato di magnesio
Resistenza all'attacco degli olii lubrificanti	nessun degrado dopo immersione in olio a 40°C per 60 g
Essudamento d'acqua (bleeding)	assenza d'acqua essudata
Temperatura di applicazione	da +5 °C a +40 °C

## Istruzioni per l'impiego

### Preparazione del sottofondo

Rimuovere tutte le parti ammalorate e incoerenti dell'area interessata al ripristino, ivi compreso il latitante di cemento. Eliminare impregnazioni di olii, grassi, vernici, calce, polvere, sporco, ecc. anche a mezzo di idrolavaggio a pressione.

Irruvidire la superficie a mezzo spazzole metalliche o altri idonei sistemi.

Per la protezione dei ferri d'armatura, dopo la pulizia meccanica, si consiglia di applicare il trattamento passivante FERROSAN o RESIN 78. Qualora la sezione dei ferri d'armatura dopo la pulizia risultasse inferiore alla sezione originaria provvedere al reintegro con saldatura di ferri aggiuntivi. E' buona norma bagnare a saturazione la superficie di ripristino prima dell'applicazione della malta. Rimuovere l'acqua in eccesso.

### Preparazione della malta

La miscelazione della malta CONCRETE ROCK S viene effettuata in una normale betoniera di cantiere. Immettere nella betoniera 2/3 dell'acqua d'impasto richiesta (ca. 3 l per sacco da 25 kg) e versare la polvere poco per volta senza interruzioni. Continuare la miscelazione aggiungendo l'ultimo 1/3 di acqua (1,6 l ca.) per almeno 2-3 minuti fino ad ottenere un impasto omogeneo e privo di grumi.

Per preparare piccole quantità di prodotto utilizzare un miscelatore meccanico a basso numero di giri. Evitare di preparare l'impasto manualmente.

Non aggiungere acqua oltre i limiti indicati in specifica.

### Posa in opera della malta

CONCRETE ROCK S miscelato come sopra indicato, può essere messo in opera a spatola o cazzuola. E' possibile l'applicazione a spruzzo a mezzo pompa per via umida.

Per riporti in più strati attendere dai 60 ai 120 min. in funzione della temperatura esterna.

Lo spessore massimo per passata non deve superare i 3 cm. Spessore minimo 0,5 cm.

La finitura non deve essere eseguita con frattazzo di ferro o cazzuola, ma esclusivamente con frattazzo di legno, plastica o gomma e mediamente entro 1 ora in funzione della temperatura esterna

### Stagionatura

In giornate ventose e nella stagione calda è raccomandato proteggere la malta stesa da una rapida evaporazione dell'acqua d'impasto mantenendo un adeguato livello di umidità a mezzo bagnatura o protezione con teli per almeno 24-48 ore.

### Consumi

La resa di CONCRETE ROCK S è di ca. 15 kg per cm di spessore

### Colore

Grigio

### Confezioni

Sacchi da kg 25 in bancali da kg 1500.

### Immagazzinaggio

CONCRETE ROCK S si conserva negli imballi originali sigillati ed in ambiente asciutto per almeno 12 mesi.

### Voce di capitolato

#### Tipo di intervento

Realizzazione di intonaci strutturali armati per murature con reti e tessuti in acciaio e fibre sintetiche.

#### Specifiche tecniche

Fornitura e posa in opera, dopo idonea preparazione del supporto, di una malta monocomponente a reattività pozzolanica fibrorinforzata a ritiro compensato priva di espansivi metallici e cloruri, pronta all'uso, ad alta resistenza meccanica, resistente all'azione aggressiva dell'ambiente, ai solfati e al gelo/disgelo, tipo CONCRETE ROCK S. L'applicazione del prodotto avverrà a mezzo cazzuola, spatola o pompa per via umida per spessori per mano non superiori ai 3 cm. L'armatura, in funzione delle caratteristiche, potrà essere inserita in via preventiva sulla muratura e fissata a mezzo chiodature oppure inserita nel primo strato di malta fresca e successivamente ricoperta completamente con un secondo strato di malta fino allo spessore di progetto.



G&P intech s.r.l.  
via Retrone 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)  
Tel. 0444 522797 - Fax 0444 348692  
E mail: info@gpintech.com - www.gpintech.com

Copyright 2013 - Tutti i diritti sono riservati

Rev. FS37/01/13

Le indicazioni contenute nel presente documento tecnico rispondono in modo reale e veritiero alle nostre migliori e attuali conoscenze. In funzione dell'attenzione e accuratezza delle diverse fasi di posa in opera sulle quali non abbiamo alcuna responsabilità, possono verificarsi delle variazioni. La nostra garanzia si limita pertanto alla qualità e costanza del prodotto fornito di cui alle indicazioni riportate.

## ALLEGATO 2

# C-NET 170BL

# C-NET 220BL

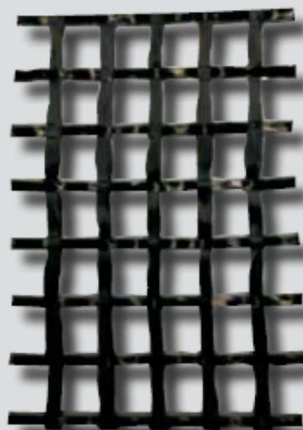
Sch. Tec. FS06-170BL/220BL

**LINEA  
FRP SYSTEM**  
Consolidamento  
strutturale

## Reti in fibra di carbonio per rinforzo strutturale

### Descrizione

C-NET 170BL e 220BL bidirezionali sono reti in fibra di carbonio per il consolidamento da impiegare con malte strutturali cementizie ed in calce.



### Dati Tecnici

	C-NET 170BL	C-NET 220BL
Grammatura rete in carbonio	170 g/m <sup>2</sup>	220 g/m <sup>2</sup>
Dimensione maglia	17x20 mm	17x20 mm
Spessore nominale rete	0,047 mm*	0,061 mm*
Resistenza a trazione filamento	4700 N/mm <sup>2</sup>	4700 N/mm <sup>2</sup>
Modulo elastico a trazione filamento	240 GPa	240 GPa
Allungamento ultimo a trazione filamento	1,8%	1,8%
Resistenza a trazione alla deformazione del 7,5‰	89 kN/m*	115 kN/m*

\* per direzione 0°/90°

### Campi di impiego

Le reti C-NET 170BL e C-NET 220BL presentano una grande flessibilità di impiego e sono idonee ad essere utilizzate nel rinforzo di strutture in c.a., c.a.p. ed in muratura, sia con malte idrauliche strutturali della linea CONCRETE ROCK o in calce e pozzolana della linea LIMECRETE.

### Istruzioni per l'impiego

Le reti C-NET 170BL e C-NET 220BL vengono posate sulla malta fresca e inglobate nella stessa. L'ulteriore passata di malta deve avvenire prima del completo indurimento del primo strato.

Per l'ulteriore ancoraggio della rete al supporto, su indicazione della D.L., possono essere posizionati gli specifici connettori AFIX in fibra aramidica e CFIX in fibra di carbonio fissati alle reti con adesivo RESIN 75 o RESIN 78 idrocompatibile.

Applicare uno spolvero di quarzo sull'adesivo prima della stesura della malta di ricoprimento (cfr. Sch. Tec. FS01-FS02).

Consultare l'ufficio tecnico dell'Azienda per eventuale assistenza.



### Confezioni

Rotoli da 50 m<sup>2</sup>: altezza 100 cm - lunghezza 50 m.

### Immagazzinaggio

Conservare il prodotto in luogo asciutto e riparato.



**G&P intech** s.r.l - via Retrone 39  
36077 Altavilla Vicentina (VI) - ITALY  
Tel. +39 0444.522797 - Fax +39 0444.348692  
E mail: [info@gpintech.com](mailto:info@gpintech.com)  
[www.gpintech.com](http://www.gpintech.com)

Copyright 2013 – Tutti i diritti sono riservati

Le indicazioni contenute nel presente documento tecnico rispondono in modo reale e veritiero alle nostre migliori e attuali conoscenze. In funzione dell'attenzione e accuratezza delle diverse fasi di posa in opera sulle quali non abbiamo alcuna responsabilità, possono verificarsi delle variazioni. La nostra garanzia si limita pertanto alla qualità e costanza del prodotto fornito di cui alle indicazioni riportate.

Rev. FS06-170BL/220BL/02/13

## ALLEGATO 3

Sch. Tec. FS08-251BA

**LINEA  
FRP SYSTEM**  
Consolidamento  
strutturale

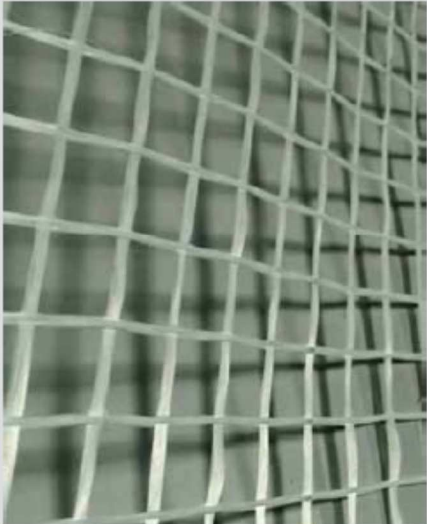
# G-NET 251BA

**Rete in fibra di vetro AR alcali resistente apprettata**

**Descrizione**  
G-NET 251 BA è una rete di rinforzo in vetro AR per l'impiego con malte cementizie e in calce strutturale. La fibra utilizzata per la rete G-NET 251 BA AR presenta un elevato contenuto in ossido di zirconio >16% (la fibra è classificata AR ai sensi della Norma UNI EN 15422) che conferisce alla rete un'elevata resistenza agli ambienti alcalini, tipici delle malte cementizie e delle calci. La fibra presenta inoltre uno speciale trattamento superficiale (appretto), che ne migliora la compatibilità e l'adesione al supporto.

**Dati Tecnici**

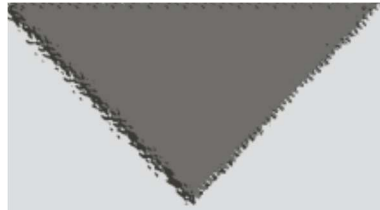
Grammatura	250 g/m <sup>2</sup>
Dimensione maglia	25 mm
Spessore fibra per direzione	0,05 mm
Resistenza a trazione filamento	>2000 MPa
Carico di rottura per direzione	46/50 kN/m
Modulo elastico a trazione filamento	70 GPa
Allungamento a rottura filamento	>3%



**Campi di impiego**  
La rete G-NET 251 BA presenta una grande flessibilità di impiego ed è idonea ad essere utilizzata in particolare nel rinforzo delle murature sia con malte cementizie linea CONCRETE ROCK e RASEDIL sia con calci strutturali linea LIMECRETE.

**Istruzioni per l'impiego**  
La rete G-NET 251 BA viene posata sulla malta fresca e inglobata nella stessa. L'ulteriore passata di malta deve avvenire prima del completo indurimento del primo strato. Per l'ulteriore ancoraggio della rete al supporto, su indicazione della D.L., possono essere posizionati gli specifici connettori AFIX in fibra aramidica o GFIX in fibra di vetro, fissati alla rete con adesivo RESIN 75 o RESIN 78 idrocompatibile. Applicare uno spolvero di quarzo sull'adesivo prima della stesura della malta di ricoprimento (cfr. Sch.Tec. FS02).

Consultare l'ufficio tecnico dell'azienda per eventuale assistenza.



### Confezioni

Rotoli da 50 m<sup>2</sup>: altezza 100 cm - lunghezza 50 m.

### Immagazzinaggio

Conservare il prodotto in luogo asciutto e riparato.



G&P intech s.r.l  
via Retrone 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)  
Tel. 0444 522797 - Fax 0444 348692  
E mail: info@gpintech.com - www.gpintech.com

Copyright 2013 - Tutti i diritti sono riservati

Le indicazioni contenute nel presente documento tecnico rispondono in modo reale e veritiero alle nostre migliori e attuali conoscenze. In funzione dell'attenzione e accuratezza delle diverse fasi di posa in opera sulle quali non abbiamo alcuna responsabilità, possono verificarsi delle variazioni. La nostra garanzia si limita pertanto alla qualità e costanza del prodotto fornito di cui alle indicazioni riportate.

Rev. FS08-251BA/02/13



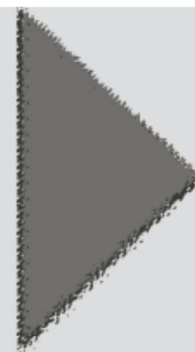
## ALLEGATO 4

## RESIN 70-75

Sch. Tec. FS 11

LINEA  
FRP SYSTEM

Consolidamento strutturale



## Adesivi epossidici per incollaggi strutturali

## Descrizione

RESIN 70 E 75 sono formulati bicomponenti a base di resine epossidiche, privi di solventi, diluenti e plastificanti particolarmente indicati come incollaggi strutturali per calcestruzzo e materiali da costruzione e per il sistema FRP SYSTEM.

RESIN 70 E 75 hanno un'elevata adesione e tixotropia (versione 75) e sono esenti da ritiro per tutti i materiali da costruzione con particolare riferimento a malte, calcestruzzi, murature, laminati sintetici, acciaio.

## Campi d'impiego

RESIN 70 E 75 vengono impiegati come adesivi strutturali nel settore dell'edilizia e delle infrastrutture per: incollaggio di elementi prefabbricati in calcestruzzo anche portanti, incollaggio di elementi ammalorati nella ristrutturazione del calcestruzzo, delle murature, del legno e dell'acciaio, incollaggio strutturale di Lamelle CFK in carbonio e di tessuti in carbonio, aramide, vetro nel ciclo FRP SYSTEM, primerizzazione e protezione dei ferri d'armatura ove necessario. RESIN 70 E 75 presentano caratteristiche tecniche e meccaniche elevate per impieghi specifici nel settore dei rinforzi strutturali.

## Vantaggi

I principali vantaggi degli adesivi RESIN 70 E 75 sono: versatilità di impiego per ogni tipo di materiale in uso in edilizia, elevato potere adesivo, assenza di ritiro, buone caratteristiche meccaniche, ottima resistenza chimica all'acqua, ai sali, agli idrocarburi, a soluzioni aggressive acide e basiche.

## Dati Tecnici

	Resin 70	Resin 75(**)
Peso specifico	1,05 g/cm <sup>3</sup>	1,10 g/cm <sup>3</sup>
Pot life a 20°C (*)	40 min.	50 min.
Fuori tatto a 20°C	6 h	7 h
Indurimento completo a 20°C	7 g	7 g
Resistenza alla compressione	56 N/mm <sup>2</sup>	58 N/mm <sup>2</sup>
Resistenza alla flessione	35 N/mm <sup>2</sup>	35 N/mm <sup>2</sup>
Resistenza alla trazione	40 N/mm <sup>2</sup>	40 N/mm <sup>2</sup>
Modulo elastico	2300 N/mm <sup>2</sup>	2400 N/mm <sup>2</sup>
Adesione al calcestruzzo	>2,5 N/mm <sup>2</sup>	> 2,5 N/mm <sup>2</sup>
Temperatura minima di applicazione	10°C	10°C

(\*) Al variare della quantità miscelata e della temperatura il pot life può cambiare.

(\*\*) Resin 75 adesivo tixotropico.

## Istruzioni per l'impiego

## Preparazione del supporto

Le aree sulle quali viene applicato l'adesivo devono essere sane, pulite, esenti da polvere, lattime di cemento, olii, grasso, sporco, ecc. Può essere necessario operare con bruschinatura, sabbiatura, pallinatura del supporto o utilizzare altri idonei sistemi di pulizia.

Il supporto deve poi avere una adeguata resistenza meccanica al fine di consentire all'adesivo di sviluppare al meglio le proprie caratteristiche meccaniche.

Nell'utilizzo degli adesivi per impieghi strutturali FRP SYSTEM è particolarmente importante definire le caratteristiche meccaniche del supporto attraverso prove di pull off del tipo raccomandate dalla ASTM D 4541 "adhesion test".

I valori di pull off riscontrati caratterizzano il supporto e ne determinano le condizioni per un corretto rinforzo con FRP SYSTEM ai sensi delle linee guida CNR DT 200/2004 e succ.

A titolo esemplificativo, ma non esaustivo, per un calcestruzzo soggetto a rinforzo a flessione con FRP, valori di pull off inferiori a 1,2 MPa richiedono in generale un adeguato preconsolidamento prima dell'applicazione dei rinforzi.

#### Miscelazione dei componenti

I componenti il sistema epossidico nel rapporto di catalisi indicato nelle confezioni, vanno miscelati in un apposito contenitore preferibilmente con un agitatore meccanico a basso numero di giri fino ad ottenere un prodotto omogeneo. Evitare di mescolare alla volta quantità eccessive di prodotto, oltre comunque i quantitativi delle singole confezioni.

#### Posa in opera

RESIN 70 ha una consistenza fluida, mentre RESIN 75 ha una consistenza tixotropica. Gli adesivi vengono applicati a mezzo rullo o pennello. In taluni casi per superfici molto porose può essere opportuno applicare preventivamente all'adesivo un primer epossidico tipo RESIN PRIMER e attendere la sua asciugatura.

Per l'impiego nel FRP SYSTEM l'adesivo viene impiegato come collante strutturale. Nel caso di impiego su tessuti FRP Sheet, CTU,CTB in carbonio, aramide e vetro la fibra va posta sull'adesivo fresco.

La fibra viene quindi accuratamente rullata esercitando una adeguata pressione al fine di consentire una perfetta impregnazione dell'adesivo. Successivamente sull'adesivo fuori tatto viene steso un ulteriore strato di resina a saturazione.

La temperatura minima di applicazione è di 10°C.

#### Consumi

In generale il consumo dipende dalle caratteristiche dell'intervento.

Per l'uso come adesivo strutturale nel FRP SYSTEM consultare l'apposita scheda tecnica.

#### Colore

Trasparente-ambrato.

#### Confezioni

RESIN 70 E 75 sono confezionati in imballi idonei per l'uso professionale e per il trasporto. Per le quantità fare riferimento alle indicazioni sulle confezioni.

#### Immagazzinaggio

RESIN 70 E 75 si conservano nei loro imballi sigillati originali ed in ambiente asciutto e riscaldato per almeno 12 mesi.

Proteggere dal gelo.

#### Precauzioni

Usare guanti di gomma durante le lavorazioni. Evitare il contatto della resina con la pelle, le mucose e gli occhi. Usare occhiali da lavoro infrangibili.

In caso di contatto accidentale lavare abbondantemente la parte imbrattata con acqua e sapone neutro.

Non utilizzare solventi per lavarsi mani, braccia e altre parti del corpo.

Nel caso di spruzzi di resina negli occhi provvedere al loro lavaggio immediatamente con acqua corrente e rivolgersi ad un oculista informandolo del tipo e natura della sostanza che ha causato l'inconveniente.

Per altre informazioni fare riferimento alla scheda di sicurezza dei prodotti.



G&P intech s.r.l.  
via Retrone 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)  
Tel. 0444 522797 - Fax 0444 348692  
E mail: info@gpintech.com - www.gpintech.com

PARTNER UFFICIALE  
DEL GRUPPO INTERNAZIONALE



Copyright 2011 – Tutti i diritti sono riservati

Rev. FS11/01/11

Le indicazioni contenute nel presente documento tecnico rispondono in modo reale e veritiero alle nostre migliori e attuali conoscenze. In funzione dell'attenzione e accuratezza delle diverse fasi di posa in opera sulle quali non abbiamo alcuna responsabilità, possono verificarsi delle variazioni. La nostra garanzia si limita pertanto alla qualità e costanza del prodotto fornito di cui alle indicazioni riportate.

# ALLEGATO 5



## Dehnmessstreifen Strain gages Jauges d'extensométrie

Widerstand  
Resistance  
Résistance 120 Ω ±0.35 %

k-Faktor  
Gage factor  
Facteur k 1.99 ±1.0 %

Quersensitivität  
Transverse sensitivity  
Sensibilité transverse 0.1 %

Bestellnummer  
Order No.  
No. de référence

1-LY11-3/120

Typ  
Type  
Type

3/120 LY11

Stückzahl  
Contents  
Quantité

10

Temperaturkoeffizient  
des k-Faktors  
Temperature coefficient  
of gage factor  
Coefficient de température  
du facteur k

93 ±10 [10<sup>-6</sup> / K]  
(-10°C ... +45°C)

Folienlos  
Foil lot  
Lot de la feuille

A417/49

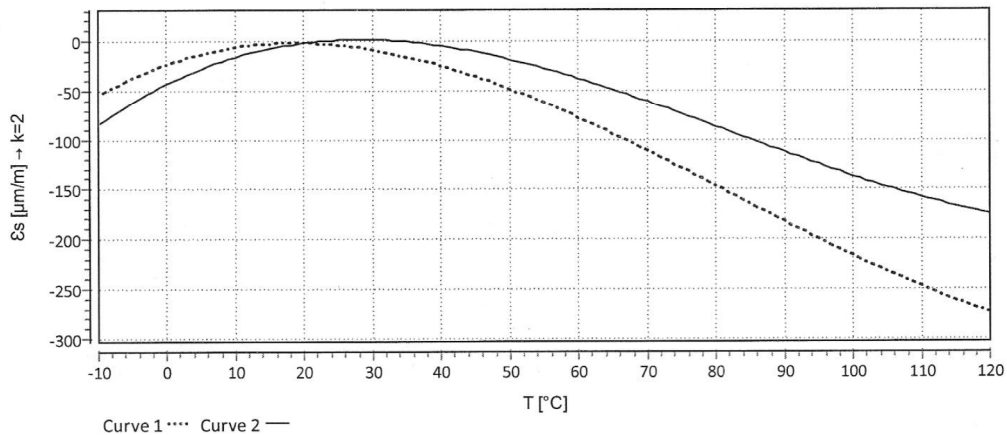
Herstellungslös  
Production batch  
Lot de fabrication

812061844

Daten / Data / Données

Temperaturkompensation: Ferritischer Stahl mit  
Temperature compensation: steel with  
Compensation de température: acier avec

α = 10.8 [10<sup>-6</sup> / K]



$$\epsilon_s(T) = -22.61 + 2.42 * T - 7.35E-02 * T^2 + 2.99E-04 * T^3 \pm (T-20) * 0.30 [\mu\text{m/m}] + 0.03330 * L * (T-20) [\mu\text{m/m}]$$

Aile techniques Daten nach OIML IR 62, bei Beachtung der abweichenden Toleranzangaben auch nach VDI/VDE 2635. Geben Sie bei Rückfragen bitte Bestellnummer und Herstellungslös an.

All specifications in accordance with OIML IR 62, also compliant with VDI/VDE 2635 if deviating tolerances are observed. In case of further inquiries please indicate order no. and production batch number.

Toutes caractéristiques techniques selon OIML IR 62 et VDI/VDE 2635 pour les indications différentes de tolérance. Pour toutes questions, indiquer le no. de référence ainsi que le lot de fabrication.

Réponse en température des jauges d'extensométrie appliquées sur des matériaux dont des coefficients de dilatation thermique α sont indiqués. Mesurée à variation continue de la température.

**Curve 1:** Jauges sans pattes de raccordement.

**Curve 2:** Jauges avec pattes de raccordement (longueur unitaire de la patte de 30 mm). Lorsque les pattes sont plus courtes, la réponse en température se trouvera entre les deux courbes 1 et 2. La représentation numérique permet de calculer exactement la réponse en température pour chaque longueur de patte.  
T = température en °C L = longueur unitaire de la patte en mm (sans dimension)

**Temperaturgang** der Dehnmessstreifen bei Applikationen mit oben angegebenen Wärmeausdehnungskoeffizienten α. Gemessen bei kontinuierlicher Temperaturänderung.

**Kennlinie 1:** DMS ohne Anschlussbändchen.

**Kennlinie 2:** DMS mit Anschlussbändchen (30mm einfache Bändchenlänge). Bei gekürzten Bändchen liegt der Temperaturgang zwischen Kennlinie 1 und 2. Die numerische Darstellung erlaubt, den Temperaturgang für jede Bändchenlänge exakt zu errechnen.  
T = Temperatur in °C L = einfache Bändchenlänge in mm (dimensionslos)

The **temperature response** refers to strain gages bonded to materials with specified coefficients of thermal expansion α. Values are measured with continuous temperature variation.

**Curve 1:** Strain gages without leads.

**Curve 2:** Strain gages with leads (simple lead length of 30 mm). If the leads are shorter, the temperature response lies between curve 1 and 2. The numeric representation allows exact calculation of the temperature response for any lead length.  
T = temperature in °C L = simple lead length in mm (dimensionless)

Kopfdaten / Header / Titre



A point (".") is used as decimal separator in data; the separator needs to be configured accordingly for import into Excel.