



Indagini Sperimentali Sulla Durabilità Di Materiali Compositi In Fibra D'acciaio

Antonio Borri, Giulio Castori

Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università degli Studi di Perugia. Via Duranti 93, 06125 Perugia

Keywords: Compositi, Monitoraggio, Durabilità, Sperimentazione.

ABSTRACT

La recente diffusione di rinforzi in fibra d'acciaio immersi in matrice cementizia ha portato all'insorgere di un notevole interesse per la durabilità di questa nuova tipologia di materiali compositi in ambienti aggressivi. Tale problema è stato infatti analizzato in vari lavori relativi a compositi fibrorinforzati a matrice polimerica, mentre più scarsi, se non del tutto assenti, sono stati gli studi specifici per le fibre metalliche.

In questa ottica, al fine di valutare l'incidenza che tale parametro (e in particolar modo la corrosione) può avere sull'efficacia dell'intervento in esame è stata condotta una campagna di prove sperimentali in laboratorio su una serie di provini in fibra d'acciaio. I provini sono stati sottoposti a prove di trazione dopo essere stati soggetti a trattamenti di invecchiamento artificiale, naturale e accelerato.

1 INTRODUZIONE

L'adeguamento ed il consolidamento di strutture esistenti, sia in c.a. che in muratura, mediante l'impiego di materiali compositi in fibra d'acciaio è in rapida e crescente diffusione. Questi sono ormai considerati valide alternative alle tradizionali tecniche di rinforzo e ristrutturazione, grazie alle loro molteplici proprietà di leggerezza, alta resistenza, alto modulo elastico e, non ultimo, il loro costo sempre più accessibile.

L'interesse scientifico verso la applicazioni innovative dei compositi per la riabilitazione strutturale e la salvaguardia del patrimonio edilizio italiano hanno attirato negli ultimi anni l'interesse di numerosi studiosi e ricercatori operanti in diversi settori dell'Ingegneria, dando vita a molteplici programmi di ricerca scientifica nazionale ed internazionale. Tra i molteplici campi di studio, molto interesse è stato suscitato, in tempi recenti, dall'analisi del comportamento del composito sotto differenti condizioni chimico-fisiche di esposizione ambientale.

Le informazioni che possono derivare da questo tipo di indagini, oltre a fornire indicazioni sulla potenziale durabilità del sistema a lungo

termine, permettono di definire quantitativamente (e non solo qualitativamente) la risposta delle strutture rinforzate sollecitate in particolari situazioni, permettendo così di sviluppare soluzioni ad hoc per la protezione delle strutture o di ottimizzare quelle attualmente disponibili.

Una simile problematica è stata infatti analizzata in vari lavori relativi a compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (David e Neuner 2001; Miyano et al. 2005; Abanilla et al. 2006; Karbhari e Amanilla 2007), mentre più scarsi, se non del tutto assenti, sono stati gli studi specifici per le fibre metalliche.

In questa ottica, al fine di valutare l'incidenza della corrosione, che, come noto, rappresenta una delle cause primarie del degrado e conseguentemente della riduzione della sicurezza strutturale, sull'efficacia degli interventi con fibre metalliche è stata condotta una campagna di prove sperimentali su una serie di provini in fibra d'acciaio.

Più in particolare, i provini dopo essere stati soggetti a diversi trattamenti di invecchiamento, sono stati sottoposti a prove di trazione, in condizioni controllate, in laboratorio.

2 COMPOSITI IN FIBRA D'ACCIAIO

2.1 Trefoli metallici

Le fibre utilizzate nella sperimentazione per la realizzazione del composito sono state fornite dalla Hardwire LLC (entrambe le tipologie sono prodotte negli USA da Hardwire LLC e sono disponibili per il mercato italiano ed europeo grazie a FIDIA S.r.l. – Technical Global Services, in virtù di un accordo di esclusiva firmato fra le parti). Più nel dettaglio, per l'esecuzione delle prove sono stati impiegati nastri a media densità (4.70 trefoli/cm) realizzati con due differenti tipologie di trefolo: 3SX e 3X2.

La fibra 3SX (Figura 1a) è costituita da trefoli di acciaio ad alto contenuto di carbonio rivestiti di ottone (3SX-B). Il trefolo è ottenuto avvolgendo insieme 4 singoli filamenti metallici (d_{fil} pari a 0.48 mm): tre filamenti sono avvolti insieme esternamente da un singolo filamento.

La fibra 3X2 (Figura 1b) è costituita invece da trefoli in acciaio ad alto contenuto di carbonio che possono essere rivestiti di ottone (3SX-B) o di zinco (3SX-G). Il trefolo è ottenuta avvolgendo insieme ad elica cinque singoli filamenti (d_{fil} pari a 0.35 mm nel caso del rivestimento in ottone e 0.37 mm nel caso del rivestimento in zinco): tre filamenti sono avvolti esternamente da due filamenti.

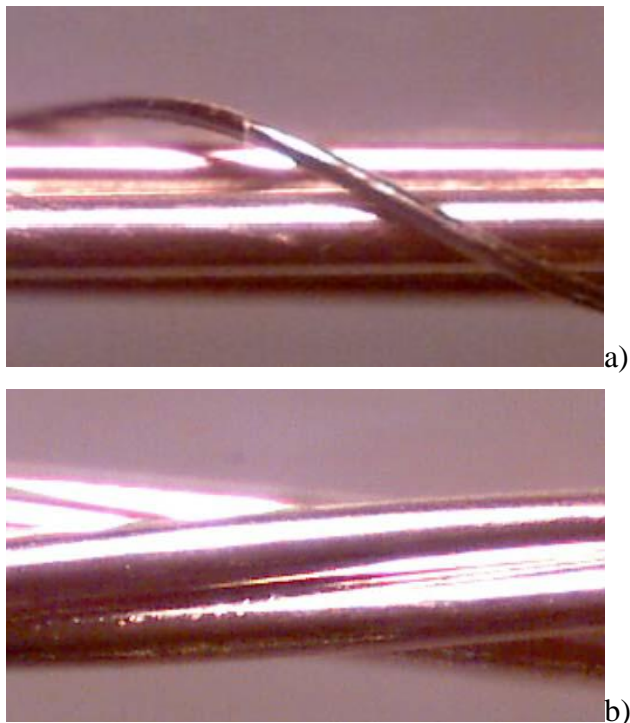


Figura 1. Fibre metalliche: a) trefoli 3SX; b) trefoli 3X2.

In accordo alla suddetta geometria, nel determinare l'area della sezione resistente, va operata una distinzione tra l'area risultante del trefolo (A_{trefolo}) e l'area effettiva del trefolo (A_{fil}), che sarà pari alla prima depurata dei vuoti che si

vengono a creare tra i filamenti costituenti il trefolo stesso.

Per la determinazione dell'area effettiva del trefolo (A_{fil}), è necessario conoscere il diametro del filo (d_{fil}) e il numero di fili contenuti all'interno del trefolo (n_{fil}):

$$A_{\text{fil}} = n_{\text{fil}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{fil}}^2}{4} \quad (1)$$

mentre l'area risultante del trefolo (A_{trefolo}) è funzione unicamente del diametro risultante del trefolo (d_{trefolo}):

$$A_{\text{trefolo}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{trefolo}}^2}{4} \quad (2)$$

In accordo alla (1) e alla (2), per le tipologie di trefolo precedentemente descritte si ottengono i valori riportati nella tabella seguente.

Tabella 1. Caratteristiche geometriche dei trefoli.

Proprietà	3SX		3X2	
	Ottone	Ottone	Zinco	
d_{fil} (mm)	0.48	0.35	0.37	
A_{fil} (mm ²)	0.181	0.096	0.108	
n_{fil}	5	4	4	
A_{trefolo} (mm ²)	0.561	0.481	0.538	
n_{trefoli}	11	11	11	
A_{nastro} (mm ²)	6.171	5.291	5.918	

2.2 Matrici

I provini sono stati confezionati utilizzando due diverse tipologie di matrice: una a base di calce idraulica e una di tipo cementizio ad alta resistenza.

Le caratteristiche meccaniche di entrambe le tipologie di matrice sono state determinate facendo riferimento alle indicazioni contenute nelle ASTM C348 e ASTM C349 (ASTM 2008). Più in particolare, per quanto riguarda le prove di flessione, la corrispondente resistenza è stata calcolata in accordo all'equazione:

$$R_f = \frac{6M}{b^3} = \frac{6}{b^3} \frac{Pl}{4} = 1.5 \frac{Pl}{b^3} \quad (3)$$

dove P è il carico massimo, l l'interasse tra gli appoggi e b il lato della sezione quadrata.

I valori della resistenza a compressione dei semiprismi ottenuti a seguito delle prove di flessione è stata invece calcolata in accordo alla seguente espressione:

$$R_c = \frac{P}{b^2} = \frac{P}{1600} \quad (4)$$

La malta a base di calce è stata dosata in volume in parti di 2/3 di sabbia ed 1/3 di calce idrata prodotta dalla Colacem S.p.A. Per quanto riguarda la sabbia utilizzata, essa deriva invece da una antica cava abbandonata sita nelle vicinanze di Farnetta (TR). In questi termini, i risultati delle prove di flessione condotte su 6 provini hanno fornito un valore medio della resistenza pari a $R_f = 0.59$ MPa. Mentre i rimanenti 12 semiprismi, sottoposti a prove di compressione, hanno fornito un valore medio della resistenza pari a $R_c = 2.56$ MPa.

La malta cementizia (nome commerciale Mapefinish, produttore Mapei) è una malta bicomponente a base di cementi ad alta resistenza, inerti a grana fine, additivi speciali e polimeri sintetici in dispersione acquosa. A seguito delle prove di caratterizzazione meccanica, la malta ha presentato una resistenza a flessione pari a $R_f = 8.61$ MPa ed una resistenza a compressione pari a $R_c = 34.48$ MPa.

3 TEST SETUP

L'analisi sperimentale di cui di seguito si riportano i risultati ha avuto un duplice obiettivo: da un lato valutare l'incidenza che l'invecchiamento (e in particolar modo la corrosione) può avere sull'efficacia di compositi in fibra d'acciaio, dall'altro valutare la differenza che, in termini prestazioni e comportamento, può avere un rivestimento in zinco rispetto al

tradizionale rivestimento in ottone.

Per meglio interpretare e comprendere il comportamento dei nastri in fibra d'acciaio si è ritenuto significativo condurre prove di trazione diretta, in quanto queste permettono di ottenere risultati di interpretazione relativamente più semplice, anche se rappresentano condizioni più severe di quelle di impiego reale.

Facendo riferimento alle indicazioni contenute nelle ASTM D3039 (ASTM 2008), le prove di trazione sono state eseguite su provini aventi le seguenti dimensioni nominali: lunghezza pari a 250 mm, larghezza pari a 15 mm e spessore pari a $2 \div 3$ mm (Figura 2).

Per la realizzazione del sistema di ancoraggio sono state utilizzate delle lamine in alluminio (lunghezza pari a 55 mm, larghezza di 20 mm e spessore pari a 1.5 mm) e una resina epossidica a due componenti (FIDPUTTY) con adesione strutturale a calcestruzzo, acciaio, legno e materiale lapideo. L'obiettivo è stato quello di realizzare, tramite l'incollaggio delle estremità del nastro all'interno delle lamine, degli elementi su cui serrare le piastre dei morsetti della macchina utilizzata per le prove, senza che il nastro venisse danneggiato.

Le prove sono state realizzate utilizzando un dinamometro Instron tipo 4505 (Figura 3) ad una temperatura di laboratorio di circa $21 \div 25$ °C ed una umidità relativa del $50 \div 60\%$.

Tutte le prove sono state eseguite in controllo di spostamento alla velocità di 2 mm/min

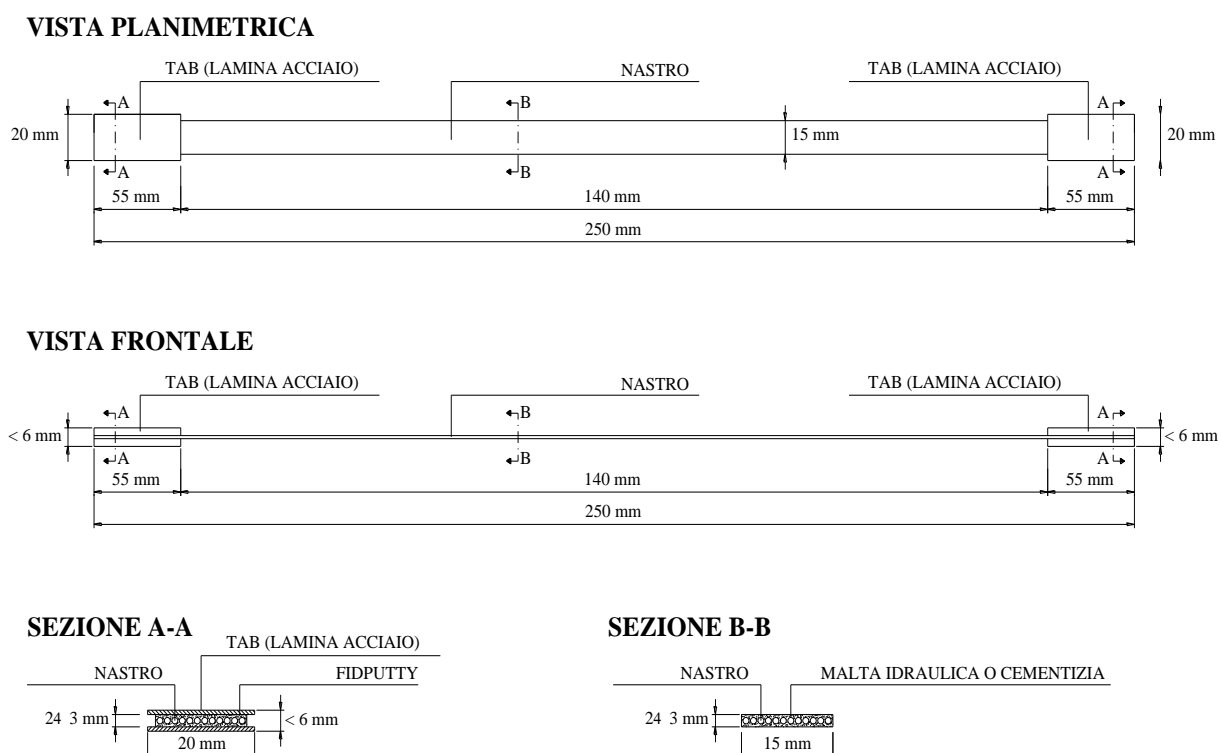


Figura 2. Dimensione e geometria dei campioni di prova.

applicando rispettivamente una cella di carico ad alta stabilità a lungo termine (ottimale quindi per le prove di trazione e compressione diretta) per monitorare l'andamento dei carichi e un estensimetro a coltello con base di misura di 50 mm per valutare con sufficiente accuratezza il modulo elastico del materiale.



Figura 3. Prove di trazione: dispositivo di prova.

Per quanto concerne l'analisi dei risultati delle suddette prove, è opportuno evidenziare che le caratteristiche meccaniche dei trefoli utilizzati per il rinforzo non possono essere dedotte semplicemente dalle caratteristiche dei singoli componenti (fili) ma devono essere determinate e verificate sperimentalmente. Come noto, sono molteplici i fattori dovuti al processo di produzione che influiscono sulle caratteristiche finali del trefolo.

Il processo di tessitura a cui i fili vengono sottoposti produce un decadimento delle proprietà meccaniche (resistenza e modulo elastico) a causa di vari fattori: geometria intrecciata del trefolo, inevitabili scorrimenti che in esso avvengono durante la sollecitazione e da una comunque non uniforme distribuzione di sforzi nei fili costituenti.

È importante dunque essere consci delle differenze tra tali valori al fine di evitare errori interpretativi e possibili contestazioni sia nella fase di progettazione che in quella di accettazione o collaudo.

Per cui oltre i valori delle caratteristiche meccaniche (tra cui la resistenza f_{fili} ed il modulo

elastico E_{fili}) dei fili non intrecciati, dichiarati dal produttore e riportati sulle schede, è indispensabile conoscere le caratteristiche del prodotto finito, ovvero del nastro. In particolare, per via sperimentale, si determineranno i valori medi, gli scarti quadratici, i coefficienti di variazione e i valori caratteristici delle seguenti grandezze:

- Carico di rottura (F_u);
- Allungamento (Δl);

Da tali risultati sperimentali è possibile ricavare poi i relativi valori dello sforzo di rottura (f_{fib}) e della deformazione ultima (ϵ_{fib}) del nastro:

$$f_{fib} = \frac{F_u}{A_{fili}}; \quad \epsilon_{fib} = \frac{\Delta l}{l} \quad (5)$$

Per la determinazione del modulo elastico del nastro (E_{fib}), si fa invece riferimento alla UNI EN ISO 527-4 (UNI 2000), in accordo alla quale il modulo di elasticità a trazione è dato dalla pendenza della secante al diagramma sforzi-deformazioni (Figura 4) tra due valori predefiniti della deformazione ($\epsilon' = 0.001$ e $\epsilon'' = 0.01$):

$$E_{trefolo} = \frac{\sigma'' - \sigma'}{\epsilon'' - \epsilon'} \quad (6)$$

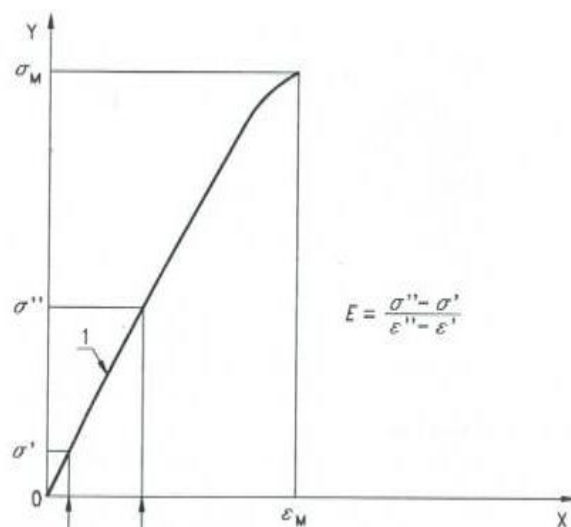


Figura 4. Determinazione del modulo elastico del nastro in accordo alla UNI EN ISO 527-4.

4 TEST MATRIX

Il campione di prova è costituito da un totale di 100 provini, di cui 64 realizzati con trefoli 3SX e 36 con trefoli 3X2 (18 con rivestimento in ottone e 18 con rivestimento in zinco).

Come già anticipato, i provini sono stati sottoposti a trattamenti di invecchiamento artificiale, naturale e accelerato per durate di tempo variabili al fine di valutare gli effetti nel

tempo dei fenomeni corrosivi sul decadimento delle proprietà meccaniche del materiale.

Tabella 2. Test matrix

PROVINI	Tipo Trefolo	Tipo Matrice	Tipo Trattamento	n° Provini
Non Invecchiati	3SX-B			6
	3X2-B	-	-	6
	3X2-G			6
Invecchiamento artificiale	3SX-B	Mapefinish	Soluzione a pH neutro	3
			Soluzione a pH acido	3
	Malta idraulica	Mapefinish	Soluzione a pH neutro	3
			Soluzione a pH acido	3
		Malta idraulica	Soluzione a pH neutro	3
			Soluzione a pH acido	3
Invecchiamento naturale	3SX-B	-	Esposizione 57 settimane ^[A]	4
			Esposizione 57 settimane ^[B]	4
			Esposizione 114 settimane ^[A]	6
			Esposizione 114 settimane ^[B]	6
		Malta idraulica	Esposizione 57 settimane ^[A]	4
			Esposizione 57 settimane ^[B]	4
			Esposizione 114 settimane ^[A]	6
			Esposizione 114 settimane ^[B]	6
Invecchiamento accelerato (NSS)	3X2-B	Malta idraulica	Esposizione 1 settimana	6
			Esposizione 2 settimane	6
			Esposizione 4 settimane	6
	3X2-G	-	Esposizione 1 settimana	6
			Esposizione 2 settimane	6
			Esposizione 4 settimane	6

^[A](Cementificio); ^[B](Centrale Termoelettrica)

Più nel dettaglio, il programma di prova (Tabella 2) si è articolato secondo il seguente schema:

– 18 provini, di cui 6 con trefoli 3SX-B (Figura 5a), 6 con trefoli 3X2-B (Figura 5b) e 6 con trefoli 3X2-G (Figura 5c), sono stati utilizzati come campione di riferimento e sono stati portati a rottura senza subire alcun processo di invecchiamento;

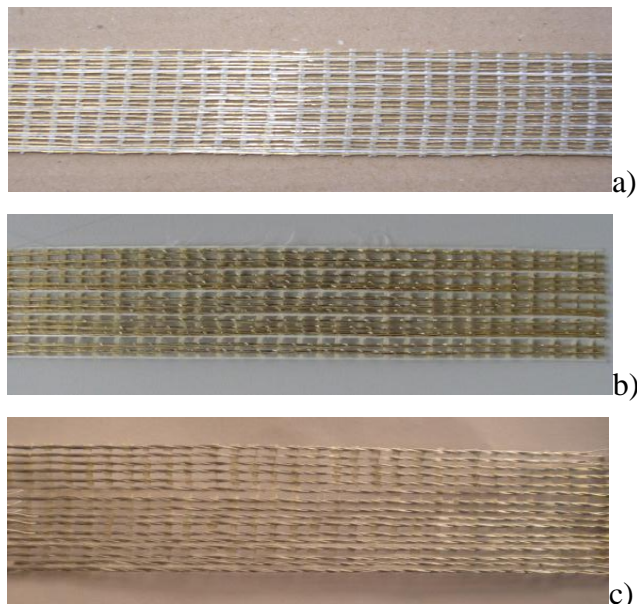
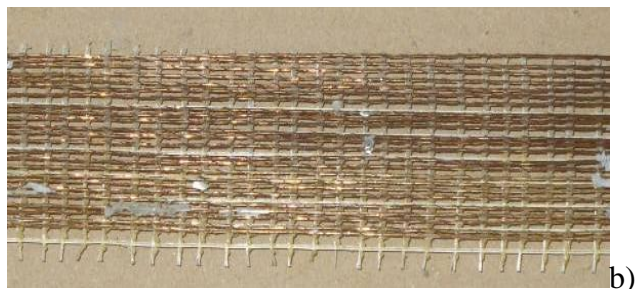


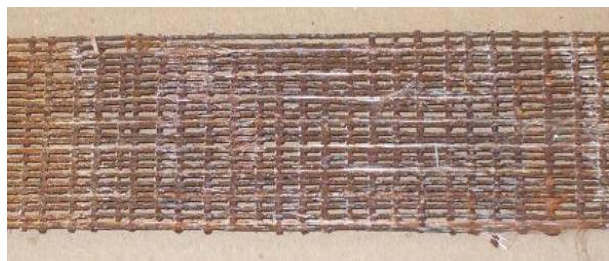
Figura 5. Provini non invecchiati.

– 18 provini (3SX-B) sono stati sottoposti, in accordo alla ASTM G36 (ASTM 1994), a prove di invecchiamento artificiale (ambienti a pH neutro o acido; alte temperature; etc.) atte a simulare la corrosione atmosferica. In particolare, 9 provini sono stati trattati in ambiente neutro (Figura 6a) con una soluzione al 42% di $MgCl_2$ in acqua (la percentuale si riferisce al sale anidro). Mentre i restanti 9 provini sono stati trattati in ambiente acido (Figura 6b) aggiungendo alla soluzione precedentemente menzionata acido nitrico (HNO_3 , 1.5 cm^3 di soluzione al 67%). Per ciascuno dei due lotti, 3 provini sono stati confezionati senza utilizzare alcun tipo di matrice, 3 utilizzando una matrice fibrorinforzata e 3 utilizzando una matrice a base di calce idraulica. Tutte le prove sono state eseguite all'interno di un termostato alla temperatura di 110 °C per 24 h;





b)



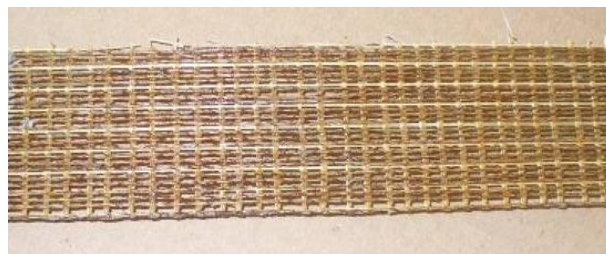
c)

Figura 6. Prove di Invecchiamento artificiale: a) test setup; b) provini invecchiati in soluzione a pH neutro; c) provini invecchiati in soluzione a pH acido.

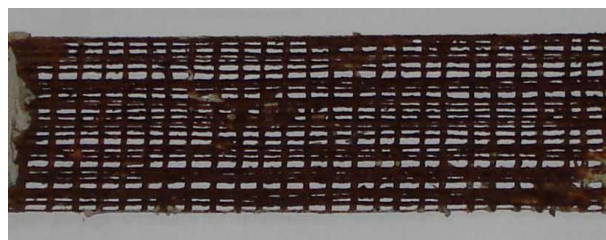
– 40 provini (3SX-B) sono stati sottoposti a prove di invecchiamento naturale (Figura 7a), ovvero sono stati lasciati all'aperto all'azione degli agenti atmosferici, oltre che ai normali cicli asciutto-umido e gelo-disgelo dell'ambiente (Hulatt et al. 2002; Tavakkolizadeh e Saadatmanesh 2001). Per avere ambienti particolarmente aggressivi, ovvero con alta concentrazione di anidride carbonica e monossidi di azoto, 20 provini sono stati posizionati all'aperto in prossimità della centrale termoelettrica di Gualdo Cattaneo e 20 provini sempre all'aperto presso un cementificio di Gubbio. Per ciascuno dei due lotti, 10 provini sono stati confezionati senza utilizzare alcun tipo di matrice, 10 utilizzando una matrice a base di calce idraulica. In entrambi i casi la durata del periodo di esposizione è stata pari rispettivamente a 57 settimane per un primo gruppo di provini (Figura 7b) e 114 settimane per i restanti (Figura 7b).



a)



b)



c)

Figura 7. Prove di Invecchiamento naturale: a) sito di esposizione (Gubbio); b) provini esposti per 57 settimane; c) provini esposti per 114 settimane.

– 36 provini, di cui 18 con rivestimento in ottone (3X2-B) e 18 con rivestimento in zinco (3X2-G), confezionati con una matrice a base di calce idraulica, sono stati sottoposti a trattamenti di invecchiamento accelerato mediante prove in camera di nebbia salina neutra (NSS, Figura 8). Sulla base della normativa ASTM B117 (ASTM 2009), il condizionamento in nebbia salina è avvenuto in una soluzione avente concentrazione 5% NaCl - 95% H₂O e pH compreso tra 6.5 e 7.2, ad una temperatura di 35 °C (in base all'equazione di Arrhenius, maggiore è la temperatura della camera climatica in soluzione acquosa più è possibile accelerare il condizionamento del provino). Per entrambe le tipologie di rivestimento (3X2-B e 3X2-G) i campioni esposti in camera sono stati valutati dopo 1, 2 e 3 settimane di esposizione. Per ogni punto sperimentale si sono ripetute le prove su 6 campioni di ciascuna tipologia.



Figura 8. Prove di Invecchiamento accelerato: test setup.

5 RISULTATI SPERIMENTALI

Il confronto tra i valori delle prove su provini non invecchiati e quelli invecchiati ha mostrato in linea generale valori decrescenti delle caratteristiche meccaniche di resistenza e di deformazione.

Nello specifico, nei paragrafi seguenti sono riportati i risultati emersi dall'indagine sperimentale, raggruppando i test effettuati in funzione della tipologia di invecchiamento cui sono stati sottoposti i campioni di prova.

5.1 *Provini non invecchiati*

Le prove eseguite hanno sostanzialmente confermato i valori della tensione di rottura dichiarati dal produttore: i valori ottenuti per via sperimentale (f_{fib}) sono in generale leggermente superiori rispetto a quelli forniti dal produttore: 2508 N/mm² (+5%) per le prove su 3SX-B, 3311 N/mm² (+3%) per le prove su 3X2-B e 3017 N/mm² (+3%) per le prove su 3X2-G.

5.2 *Provini sottoposti ad invecchiamento artificiale*

Per quanto riguarda le prove di invecchiamento artificiale (Tabella 3), mentre per i provini privi di matrice non sono state osservate variazioni significative della resistenza a trazione (-6%), nei provini con malta fibrorinforzata e con malta idraulica si sono avuti modesti decrementi medi pari a circa il 17% e il 19% rispettivamente.

Il che probabilmente deve essere imputato all'azione "aggressiva" della calce idraulica oltre al fatto che la presenza di microfessure all'interno della matrice finisce per creare dei canali preferenziali, che permettono di intensificare l'azione "corrosiva" della soluzione utilizzata per il trattamento sul provino, acuendone gli effetti.

E' altresì interessante osservare che il degrado meccanico dovuto all'invecchiamento abbia avuto ampiezza percentuale sensibilmente maggiore per il trattamento con soluzioni a pH acido piuttosto che per quello con soluzioni a pH neutro.

5.3 *Provini sottoposti ad invecchiamento naturale*

Per quanto riguarda le prove di invecchiamento naturale (Tabella 3), i risultati dei test sui provini rimasti esposti per un periodo di 57 settimane hanno determinato un decremento medio di resistenza a trazione pari al 30% per i provini privi di malta e al 42% per i provini con malta idraulica. Tenuto conto dell'ampiezza (ridotta) del campione statistico realizzato e della

conoscenza parziale delle condizioni di esposizione adottate, quest'ultimo risultato richiederebbe un approfondimento maggiore.

Se, infatti, le diverse condizioni di esposizione (Cementificio e Centrale Termoelettrica) non hanno prodotto differenze significative (6%) nei risultati per i provini privi di malta, è maggiormente evidente la discordanza (13%) di risultati nel caso dei provini con malta idraulica. Tanto è vero che considerando i provini esposti in prossimità della Centrale Termoelettrica di Gualdo Cattaneo, la differenza in termini di resistenza a trazione tra i provini privi di malta e quelli con malta idraulica è di fatto del tutto trascurabile (3%), mentre nel caso dei provini di Gubbio tale differenza è fortemente accentuata (22%).

Per quanto concerne invece i campioni di prova esposti per un periodo di 114 settimane, i test sperimentali sono ancora in fase di esecuzione e i risultati verranno presentati prossimamente.

5.4 *Provini sottoposti ad invecchiamento accelerato*

Infine vengono riportati i valori di resistenza ottenuti su campioni esposti in camera a nebbia salina e valutati a 1,2 e 4 settimane d'esposizione. In questo caso i campioni sono rimasti a contatto con una atmosfera umida un tempo notevolmente inferiore a quello di esposizione naturale.

I risultati dei test evidenziano come per i trefoli 3X2-B la resistenza meccanica tenda a degradare per poi assestarsi su valori pressoché costanti (Tabella 4). A fronte di un decremento di resistenza iniziale, valutato dopo una 1 settimana, pari al 17%, tale valore è risultato essere pari al 10% e 9% dopo 2 e 3 settimane rispettivamente.

Al contrario nei trefoli 3X2-G tale decremento è significativamente inferiore (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**): 2% dopo una settimana, 5% dopo 2 e 3 settimane, a testimonianza dunque della maggiore efficacia protettiva del rivestimento in zinco rispetto a quello in ottone.

Tabella 3. Risultati prove sperimentali: trefoli 3SX-B.

PROVINI	Tipo Matrice	Tipo Trattamento	n° Provini	Tensione Crisi (N/mm ²)	$\eta_{\text{invecchiamento}}$
Non Invecchiati	-	-	6	2508	-
Invecchiamento artificiale	-	Soluzione a pH neutro	3	2544	1.01
		Soluzione a pH acido	3	2193	0.87
	Mapectin	Soluzione a pH neutro	3	2093	0.83
		Soluzione a pH acido	3	2077	0.83
	Malta idraulica	Soluzione a pH neutro	3	2143	0.85
		Soluzione a pH acido	3	1897	0.76
Invecchiamento naturale	-	Esposizione 57 settimane ^[A]	4	1835	0.73
		Esposizione 57 settimane ^[B]	4	1680	0.67
		Esposizione 114 settimane ^[A]	6	Test in esecuzione	
		Esposizione 114 settimane ^[B]	6	Test in esecuzione	
	Malta idraulica	Esposizione 57 settimane ^[A]	4	1274	0.51
		Esposizione 57 settimane ^[B]	4	1616	0.64
		Esposizione 114 settimane ^[A]	6	Test in esecuzione	
		Esposizione 114 settimane ^[B]	6	Test in esecuzione	

^[A](Cementificio); ^[B](Centrale Termoelettrica)

Tabella 4. Risultati prove sperimentali: trefoli 3X2-B.

PROVINI	Tipo Matrice	Tipo Trattamento	n° Provini	Tensione Crisi (N/mm ²)	$\eta_{\text{invecchiamento}}$
Non Invecchiati	-	-	6	3311	-
Invecchiamento accelerato (NSS)	Malta idraulica	Esposizione 1 settimana	3	2737	0.83
		Esposizione 2 settimane	3	2987	0.90
		Esposizione 4 settimane	3	3011	0.91

Tabella 5. Risultati prove sperimentali: trefoli 3X2-G.

PROVINI	Tipo Matrice	Tipo Trattamento	n° Provini	Tensione Crisi (N/mm ²)	$\eta_{\text{invecchiamento}}$
Non Invecchiati	-	-	6	3017	-
Invecchiamento accelerato (NSS)	Malta idraulica	Esposizione 1 settimana	3	2961	0.98
		Esposizione 2 settimane	3	2859	0.95
		Esposizione 4 settimane	3	2869	0.95

6 CONCLUSIONI

L'esecuzione delle prove in laboratorio, consistenti in prove di trazione su provini soggetti a processi di invecchiamento artificiale, naturale e accelerato ha permesso invece di valutare la durabilità dei compositi in fibra di acciaio in ambienti aggressivi. In particolare, in riferimento ai dati sperimentali finora elaborati, le prove effettuate su provini invecchiati artificialmente hanno mostrato in linea generale valori sensibilmente decrescenti delle caratteristiche meccaniche di resistenza e di deformazione. Tale decremento è risultato essere invece più significativo per le prove di invecchiamento naturale. In entrambi i casi è stato possibile osservare un miglior comportamento dei provini privi di matrice rispetto a quelli confezionati con

l'uso di matrici a base di idraulica. Alla luce di quest'ultimo risultato, restano da indagare alcuni argomenti, tra cui il comportamento dei rinforzi in presenza di una matrice cementizia e di eventuali vernici protettive.

Infine per quanto concerne i risultati delle prove di invecchiamento accelerato, è stato possibile osservare la maggiore efficacia protettiva del rivestimento in zinco rispetto a quello in ottone.

7 RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano la FIDIA s.r.l. per la fornitura dei compositi in fibra d'acciaio. Si ringrazia inoltre il personale del laboratorio della TEC.INN. per l'assistenza fornita durante la preparazione dei campioni di prova.

Ricerca eseguita con il contributo DPC-ReLUIS (Progetto triennale 2010-2013; Task 1.1.1 e Task 2.3.1).

BIBLIOGRAFIA

- Abanilla, M.A., Li, Y., Karbhari, V.M., 2006. Durability characterization of wet layup carbon/epoxy composites used in external strengthening. *Composites: Part B*, **37**(2-3), 200-211.
- ASTM Standards (ASTM B 117), 2008. Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. *ASTM International*.
- ASTM Standards (ASTM C 348), 2008. Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. *ASTM International*.
- ASTM Standards (ASTM C 349), 2008. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure). *ASTM International*.
- ASTM Standards (ASTM D 3039), 2008. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. *ASTM International*.
- ASTM Standards (ASTM G 36), 1994. Standard Practice for Evaluating Stress-Corrosion-Cracking Resistance of Metals and Alloys in a Boiling Magnesium Chloride Solution. *ASTM International*.
- David, E., Neuner, J.D., 2001. Environmental durability studies for FRP systems. Definition of normal condition of use of FRP for structural strengthening applications. *CICE 01 International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, 12-14 December, Hong Kong, China.
- Miyano, Y., Nakada, M., Sekine, N., 2005. Accelerated testing for long-term durability of FRP laminates for marine use, *Journal of Composite Materials*, **39**(1), 5-20.
- Karbhari, V.M., Amanilla, M.A., 2007. Design factors, reliability, and durability prediction of wet layup carbon/epoxy used in external strengthening, *Composites: Part B*, **38**(1), 10-23.
- Hulatt, J., Holloway, L., Thorne, A., 2002. Preliminary investigations on the environmental effects on new heavyweight fabrics for use in civil engineering, *Composites: Part B*, **33**, 407-414.
- Tavakkolizadeh, M., Saadatmanesh, H., 2001. Galvanic corrosion of carbon and steel in aggressive environments, *Journal of Composites for Construction*, **5**(3), 200-210.
- UNI Standard (UNI EN 1542), 2000. Test Methods – Measurement of bond strength by pull-off. *Ente Nazionale Italiano di Unificazione*.