

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

(CLASSE DELLE LAUREE IN INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE - N.8)

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE

ELABORATO DI LAUREA

in

Tecnica delle Costruzioni

**CARATTERIZZAZIONE MECCANICA
DI STAFFE IN GFRP**

RELATORI

Ch.mo Prof. Dott. Ing. Gaetano MANFREDI

Ch.mo Prof. Dott. Ing. Gian Piero LIGNOLA

CANDIDATO

Raffaele ERRICHELLO

Matr. 520/979

CORRELATORI

Ch.mo Dott. Ing. Fabio NARDONE

ANNO ACCADEMICO 2011/12



INDICE

INTRODUZIONE	1
 CAPITOLO I	
I MATERIALI FIBRORINFORZATI	5
I. 1 GENERALITA'	5
I. 2 CARATTERISTICHE FISICO – MECCANICHE	6
I. 3 FASE FIBROSA	9
I.3.1 FIBRE DI VETRO	12
I.3.2 FIBRE DI CARBONIO	14
I.3.3 FIBRE ARAMMIDICHE	16
I. 4 FASE MATRICE	18
I.4.1 RESINE	19
I. 5 TECNICA DI PRODUZIONE – PULTRUSIONE	20
I. 6 BARRE DI FRP	23
I.6.1 PROPRIETA' FISICHE	25
I.6.1.1 COEFFICIENTE DI DILATAZIONE TERMICA	25
I.6.1.2 EFFETTI DELLA TEMPERATURA	27
I.6.2 PROPRIETA' MECCANICHE	28
I.6.2.1 RESISTENZA E MODULO DI ELASTICITA' A TRAZIONE IN DIREZIONE LONGITUDINALE	28
I.6.2.2 FATICA STATICA (CREEP RUPTURE)	29
I. 7 GRIGLIE DI FRP	30
I. 8 STAFFE DI FRP	31
 CAPITOLO II	
APPROCCIO NORMATIVO	34
II. 1 LINEE GUIDA CNR-DT 203/2006	34
II.1.1 CARATTERIZZAZIONE DELLE BARRE DI FRP	36
II.1.1.1 CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA	36



II.1.1.2 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA.....	37
II.1.1.3 SCHEDA TECNICA TIPO PER LE BARRE DI FRP	39
II. 2 LINEE GUIDA ACI 440.3R-04 E ASTM.....	41
II.2.1 METODO DI PROVA A TRAZIONE DI BARRE IN FRP.....	43
II.2.2 CAMPIONAMENTO E TEST	46
II.2.3 PRINCIPALI TIPOLOGIE DI PROVE DELL'ACI 440.3R-04 PER LA CARATTERIZZAZIONE DI BARRE E STAFFE IN FRP UTILIZZATE COME RINFORZO PER STRUTTURE IN CALCESTRUZZO	49
 CAPITOLO III	
CAMPAGNA SPERIMENTALE.....	67
IV. 1 PROVE PRESENTI IN LETTERATURA.....	67
IV. 2 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI STAFFE IN GFRP	84
IV. 3 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI BARRE IN GFRP.....	95
 CAPITOLO IV	
CONCLUSIONI.....	106
 BIBLIOGRAFIA	108



INDICE DELLE FIGURE

Figura I.1 – Barre e staffe di GFRP

Figura I.2 – (a) diverse tipologie di rinforzo;

(b) schema dell'interfaccia tra fibra di rinforzo e matrice

Figura I.3 – Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito

Figura I.4 – Legami costitutivi di fibre, matrice e corrispondente composito

Figura I.5 – a) Fibre di carbonio in tessuto, b) Fibre di aramide in tessuto,

c) Tessuto di fibre di vetro, d) Tessuto ibrido vetro-aramide

Figura I.6 – Tipologie di fibre

Figura I.7 – Matrice

Figura I.8 – Tipici rotoli di fibre di vetro

Figura I.9 – Tipici rotoli di fibre di carbonio

Figura I.10 – Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo del comportamento a trazione monoassiale

Figura I.11 – Tipici rotoli di fibre aramidiche

Figura I.12 – Schematizzazione del processo produttivo

Figura I.13 – Alcuni esempi di sezioni realizzate con la tecnica della pultrusione

Figura I.14 – Materiali pultrusi

Figura I.15 – Tipologie di barre di FRP in commercio

Figura I.16 – Fessurazione indotta dalle tensioni circonferenziali

Figura I.17 – Comportamento tensione – deformazione di alcune fibre e dell'acciaio

Figura I.18 – Flat Coupon Test

Figura I.19 – Sollecitazioni nella zona curva delle staffe di FRP

Figura I.20 – Attorcigliamento delle fibre più interne nella zona curva delle staffe di FRP:

(a) fibre nude dopo la rimozione della resina;

(b) disegno schematico dell'orientamento delle fibre in corrispondenza della piegatura

Figura I.21 – Tipiche staffe di FRP

Figura II.1 – Dispositivi di afferraggio delle barre per test di trazione

Figura II.2 – Scheda tecnica tipo per barre di FRP



- Figura II.3** – Lunghezza di ancoraggio delle barre per test di trazione
- Figura II.4** – Test di aderenza per la barra disposta verticalmente
- Figura II.5** – Test di aderenza per le barre disposte orizzontalmente
- Figura II.6** – Schema dettagliato dell'apparecchio di prova
- Figura II.7** – Apparecchio di prova
- Figura II.8** – Configurazione di un campione
- Figura II.9** – Apparecchiatura di prova
- Figura II.10** – Dimensioni del cilindro di calcestruzzo
- Figura II.11** – Rappresentazione schematica del setup per la prova B.12
- Figura II.12** – Disposizione degli estensimetri (strain gauge)
- Figura II.13** – Foto di una tipica prova B.12 su barra in FRP, piegata ad U
- Figura III.1** – Dettagli dei campioni testati
- Figura III.2** – Due diverse disposizioni degli estensimetri
- Figura III.3** – Set-up di prova
- Figura III.4** – Gruppi di staffe FRP testati nella Fase I
- Figura III.5** – Disposizione degli estensimetri
- Figura III.6** – Setup di prova (Fase I)
- Figura III.7** – Tipiche rotture di staffe in CFRP
- Figura III.8** – Dettagli di staffe CFRP incorporate in blocchi di cemento (Fase II)
- Figura III.9** – Setup di prova (Fase II)
- Figura III.10** – Dettaglio dei campioni testati: (a) Dimensioni dei campioni-C per il test B.5
(b) Dimensioni dei campioni-U per il test B.12
- Figura III.11** – Staffa campione utilizzata per i test
- Figura III.12** – Dettagli costruttivi di una coppia di inserti angolari
- Figura III.13** – Viste tridimensionali del particolare inserto angolare
- Figura III.14** – Foto degli inserti angolari prodotti
- Figura III.15** – Parte centrale: (a) dettagli costruttivi
(b) vista tridimensionale
- Figura III.16** – Foto delle parti centrali prodotte
- Figura III.17** – Forcella: (a) dettagli costruttivi
(b) vista tridimensionale
- Figura III.18** – Foto delle forcelle prodotte



Figura III.19 – Cravatta: (a) dettagli costruttivi

(b) vista tridimensionale

Figura III.20 – Foto delle cravatte prodotte

Figura III.21 – Fasi di assemblaggio della strumentazione di prova

Figura III.22 – Foto della strumentazione assemblata con una staffa campione

Figura III.23 – Foto della strumentazione completa col 1° metodo di applicazione del carico

Figura III.24 – Foto della strumentazione completa col 2° metodo di applicazione del carico

Figura III.25 – Set-up impiegato per test di trazione su barre FRP

Figura III.26 – Posizionamento cella di carico

Figura III.27 – Predisposizione base di lettura LVDT

Figura III.28 – Serraggio della barra

Figura III.29 – Particolare serraggio barra

Figura III.30 – Predisposizione basamento ospitante LVDT

Figura III.31 – Applicazione degli incrementi di carico

Figura III.32 – Postazione di acquisizione dati

Figura III.33 – Tipica modalità di crisi delle barre di diametro D8

Figura III.34 – Tipica modalità di crisi delle barre del diametro D8

Figura III.35 – Tipica modalità di crisi delle barre del diametro D8

Figura III.36 – Stima della lunghezza del campione di barra

Figura III.37 – Tubo di vetro impiegato per la stima del diametro equivalente

Figura III.38 – Immersione della barra nel tubo di vetro impiegato
per la stima del diametro equivalente



INDICE DELLE TABELLE

- Tabella I.1** – Proprietà delle varie fibre di vetro
- Tabella I.2** – Coefficienti di dilatazione termica
- Tabella II.1** – Metodi di test per barre utilizzate come rinforzo per calcestruzzo
- Tabella III.1** – Risultati dei test realizzati nel 1997 (*Bent Effect on Strength of CFRP Stirrups*)
- Tabella III.2** – Risultati dei test sui campioni di staffe a U in CFRP, prodotto E
- Tabella III.3** – Dettagli e risultati dei test effettuati su Staffe in CFRP vincolate in blocchi di cemento (Fase II)
- Tabella III.4** – Dettagli dei campioni testati
- Tabella III.5** – Risultati della campagna sperimentale: resistenze in corrispondenza della piegatura
- Tabella III.6** – Risultati delle prove delle staffe D8 sulla base del diametro nominale
- Tabella III.7** – Risultati delle prove delle barre D8 sulla base del diametro nominale
- Tabella III.8** – Risultati delle prove delle barre D8 sulla base del diametro equivalente



INTRODUZIONE

Oggi, nel corso della progettazione, al progettista si presenta un campo di possibilità sempre più ampio e crescente in cui le scelte dei materiali e dei processi di trasformazione possono combinarsi dando luogo a quella che è stata definita “*iperscelta*”: per un dato prodotto non c'è più un solo materiale che si impone come scelta quasi obbligata; esistono invece diversi materiali in concorrenza tra di loro. Solo un'analisi approfondita e allargata all'intero processo produttivo e alla vita successiva del prodotto, può portare a individuare la soluzione più soddisfacente. La moltiplicazione dei materiali disponibili è, dunque, causa ed effetto di moltiplicazioni più profonde nella loro stessa natura per cui diviene sempre più necessaria la specializzazione dell'ingegnere in campi settoriali e specifici al fine di garantire che la produzione soddisfi il complesso di prestazioni richieste: la “*progettazione ad hoc*”. Alla luce di queste considerazioni si può asserire che i materiali compositi rappresentano proprio l'archetipo di questa nuova concezione di progettazione.

Già nell'antichità si era capito che, accoppiando diversi materiali fra di loro, si ottenevano prodotti finiti con caratteristiche migliori, tant'è che si può affermare che la scoperta dei materiali compositi risale alla civiltà della Mesopotamia dove è noto che, gli antichi egizi erano soliti miscelare la paglia con il fango/argilla al fine di ottenere mattoni da costruzione più resistenti e meno fragili di quelli costituiti dal solo fango/argilla.

Tuttavia, per avere i primi materiali compositi in FRP bisogna aspettare il XX secolo; infatti, solo nei primi anni 40 viene prodotto il primo manufatto (una barca) in vetroresina. Successivamente, negli anni 60, compaiono le fibre di carbonio ad alta resistenza, mentre nei primi anni 70 vede la luce la fibra aramidica con il nome commerciale di kevlar.

Oggi, l'uso dei materiali fibrorinforzati in sostituzione dell'acciaio, per la realizzazione di elementi strutturali di calcestruzzo, costituisce una pratica ormai diffusa in molti paesi del



mondo date le peculiari caratteristiche di leggerezza, elevata resistenza a trazione, elevato valore del modulo elastico e proprietà anticorrosive. Soprattutto quest'ultima rende il loro impiego particolarmente vantaggioso in particolari situazioni. Come è ben noto, infatti, una delle maggiori cause di degrado delle opere in cemento armato è la corrosione delle armature, sia per la riduzione delle aree di acciaio che ne deriva, che per i processi di danneggiamento del calcestruzzo stesso. Inizialmente l'acciaio è protetto dalla corrosione dallo stesso calcestruzzo, tuttavia, la presenza di numerosi agenti aggressivi che causano la carbonatazione del calcestruzzo, la diffusione dei cloruri, la combinazione di condizioni avverse di umidità e temperature, possono portare alla depassivazione delle armature ed alla formazione di ossido di ferro (ruggine) con le conseguenze che ciò comporta (deterioramento del calcestruzzo e riduzione della vita utile).

In edilizia, il ricorso alla nuova tecnologia si è dimostrato particolarmente vantaggioso soprattutto per la realizzazione di impalcati da ponte o di edifici per uso civile o industriale. Le ragioni che in tal caso conducono alla scelta degli FRP possono essere legate non solo all'esigenza di garantire un'adeguata durabilità dell'opera, ma anche alla possibilità di avvalersi di ulteriori specifiche proprietà dei compositi fibrorinforzati, quali ad esempio la trasparenza magnetica. Quest'ultima proprietà può, infatti, risultare utilissima in determinate circostanze, come ad esempio nella realizzazione di sale ospedaliere, allo scopo di evitare interferenze con le più moderne attrezzature per la risonanza magnetica e per la diagnostica ad immagini. Altre possibili applicazioni, che appaiono come particolarmente promettenti ed attrattive, riguardano le strutture a carattere provvisoriale e i rivestimenti delle gallerie.

Appare evidente che l'impiego di tali materiali, in sostituzione dell'acciaio, aumenta sensibilmente il costo iniziale della struttura, ma tale incremento può risultare accettabile rispetto al costo totale, se viene riguardato in funzione della vita utile dell'opera (inglobando



cioè, anche i costi della manutenzione). Dal punto di vista teorico, ciò che soprattutto va tenuto in conto è il diverso comportamento meccanico degli FRP, il cui legame costitutivo è essenzialmente elastico lineare fino a rottura.

Lo scopo di questo lavoro di tesi, è quello di caratterizzare staffe (e quindi barre) in GFRP, in armonia con le Norme attualmente vigenti NTC 2008 e con le prove proposte dall'American Concrete Institute (ACI) nel documento dal titolo: *“Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures”* (2004). Nel 2006 il Consiglio Nazionale Delle Ricerche (CNR) ha pubblicato le *“Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Armato con Barre di Materiale Composito Fibrorinforzato”* (CNR-DT 203/2006), concepite sulla base delle indicazioni normative preesistenti Eurocodice2 del 1991, e non dunque alla normativa attualmente vigente NTC 2008.

Dunque il lavoro svolto è consistito, innanzitutto nel prendere in esame le linee guida e le prove sperimentali disponibili nella letteratura scientifica, per poi avviare una campagna sperimentale (in parte, realizzata per la prima volta in Italia) al fine di caratterizzare meccanicamente staffe in GFRP. A tal fine sono state caratterizzate, dapprima, barre in GFRP (di diametro 8 mm) attraverso una prova di trazione monotona a carico crescente (metodo di prova B.2 dell'ACI 440.3R-04 descritto anche nel CNR-DT 203/2006) in modo da conoscere le proprietà meccaniche della staffa nella sua estensione longitudinale. Sono in corso prove di trazione sulle barre piegate (staffe chiuse di diametro 8 mm) in modo da conoscere le proprietà meccaniche offerte dalla zona piegata e quindi l'influenza della stessa sulla resistenza a trazione dell'intera staffa. Per le prove sulle staffe in FRP si è fatto riferimento alla prova B.12 dell'ACI 440.3R-04 e dunque si è reso necessario progettare e realizzare (in collaborazione con l'ATP srl) l'attrezzatura descritta nel documento, modellandola in



funzione delle caratteristiche geometriche dei campioni da testare. In realtà l'ACI 440.3R-04 fornisce anche un altro metodo di test (B.5) su staffe in FRP con il quale, come vedremo nel capitolo delle prove presenti in letteratura, si ottengono valori di resistenza più attendibili rispetto al metodo B.12 utilizzato nelle nostre prove.



CAPITOLO I

I MATERIALI FIBRORINFORZATI

I.1 GENERALITA'

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

I vantaggi dell'FRP, oltre alle elevate proprietà meccaniche, sono molteplici. Tra i quali:

- Leggerezza e facilità di trasporto (i materiali fibrorinforzati hanno un peso notevolmente inferiore rispetto a quelli in acciaio o ferro zincato, agevolandone il trasporto);
- Rapidità e facilità di messa in opera (la particolare leggerezza dei manufatti realizzati mediante assemblaggio di profili pultrusi, permettono un significativo risparmio nei tempi di installazione e facilitano il montaggio e messa in opera, anche in luoghi di difficile accesso ai mezzi meccanici);
- Caratteristiche anticorrosive (grazie alla natura anticorrosiva delle materie prime impiegate per la produzione di prodotti fibrorinforzati, l'applicazione dei pultrusi risulta essere particolarmente vantaggiosa in ambienti chimici aggressivi);
- Isolamento elettrico (i compositi pultrusi non sono conduttori e quindi non necessitano di "messa a terra", con risparmi notevoli sui costi di realizzazione e manutenzione del relativo impianto);
- Trasparenza magnetica (i compositi FRP sono amagnetici, proprietà utilissima nella realizzazione, ad esempio, di sale ospedaliere);

- Durabilità nel tempo (i compositi FRP, grazie alla particolare resistenza alla corrosione, garantiscono un'eccezionale durata nel tempo con conseguente abbattimento dei costi di manutenzione);
- Estetica (la tecnologia della pultrusione ed i materiali utilizzati consentono, partendo dalla progettazione del manufatto, valide soluzioni estetiche evitando aggravii di costi dovuti alla necessità di applicare, in fase successiva, carter di finitura).

I materiali compositi presi in esame nel CNR-DT 203/2006 si presentano sotto forma di tessuti, lamine, barre e griglie.

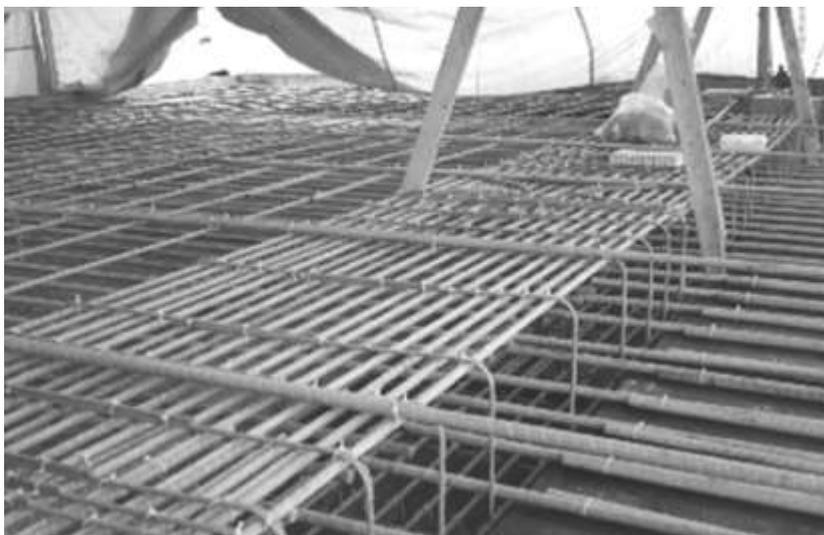


Fig. I.1 – Barre e staffe di GFRP

Nei paragrafi successivi sono analizzate le caratteristiche dei materiali, le fasi del processo produttivo (*pultrusione*) e i principali elementi strutturali in FRP.

I.2 CARATTERISTICHE FISICO - MECCANICHE

Un materiale composito è un materiale costituito da una combinazione di due o più componenti che contribuiscono mutuamente a fornire proprietà meccaniche e fisiche complessivamente superiori, o comunque più idonee all'uso che ci si prefigge, a quelle dei suoi singoli costituenti. In generale, la ragione per la quale si realizza un materiale composito,

è quella di unire le caratteristiche diverse dei singoli materiali costituenti e dare luogo ad un materiale di caratteristiche meccaniche e prestazionali migliori (come la resistenza a forti sollecitazioni, agli agenti chimici, alle elevate temperature etc).

In generale, un materiale composito è costituito da:

- *la matrice* che, bloccando le fibre, trasferisce loro il carico esterno e le protegge dai fattori ambientali, dall'usura e da eventuali azioni meccaniche di taglio;
- *il materiale di rinforzo* (o carica) che viene aggiunto sotto forma di fibre lunghe, fibre corte o particelle (Figura I.2.a);
- *l'interfaccia* tra il materiale di rinforzo e la matrice (Figura I.2.b).

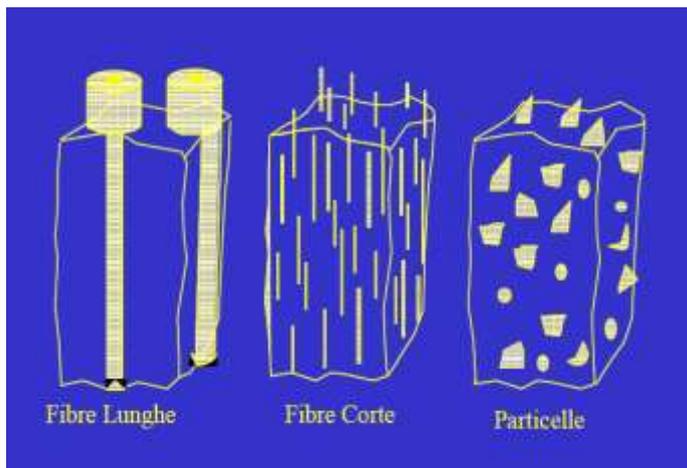
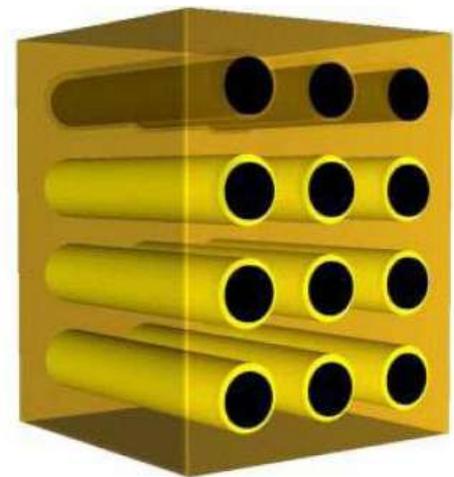


Fig. I.2 – (a) diverse tipologie di rinforzo



(b) schema dell'interfaccia tra fibra di rinforzo e matrice

In particolare, gli FRP sono costituiti da due fasi chimicamente e fisicamente distinte: una è la fase *fibrosa* che raggiunge il 65% del volume del composito, l'altra è la fase *matrice*.

La matrice può essere considerata come un continuo isotropo; la fase di rinforzo, ad eccezione della fibra di vetro, è invece un materiale anisotropo.

Inoltre, per ottenere una maggiore aderenza tra queste due componenti, come già accennato, ne viene applicata una terza, intermedia tra le due: “l’interfaccia”(o *interfase*). Essa consiste in uno strato molto sottile, localizzato sulla superficie del rinforzo, le cui caratteristiche, pur non contribuendo direttamente alle proprietà meccaniche globali del composito, sono fondamentali per il successo del sistema complessivo nelle applicazioni strutturali. Non vada dimenticato che la mancanza di adesione tra fibre e matrice è una delle cause principali di cedimento strutturale dei materiali compositi.

Ogni singolo componente ha, quindi, una funzione specifica all’interno del composito, svolta grazie alle proprie caratteristiche fisico-chimiche.

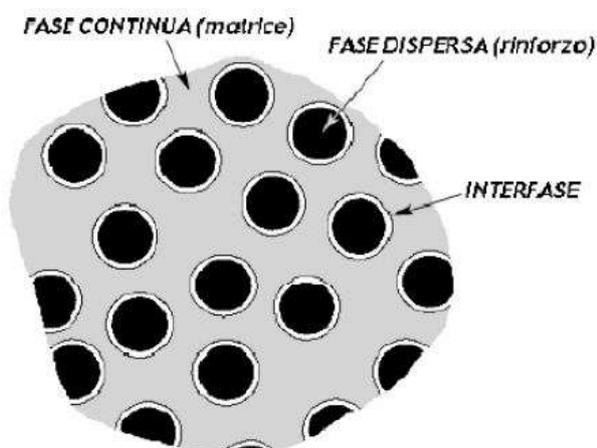


Fig. I.3 – Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito

In sintesi, dunque, la maggior parte dei compositi è costituita da fibre che posseggono un’elevata resistenza e rigidità, mentre la loro deformazione a rottura è inferiore a quella della matrice.

Se consideriamo i legami costitutivi di fibre, matrice e corrispondente composito si osserva:

- Rigidità del composito inferiore rispetto a quella delle fibre;

- Deformazione attinta a rottura uguale per il composito e per le fibre (superato il valore di $\varepsilon_{fib,max}$ non è possibile un completo trasferimento degli sforzi dalle fibre alla matrice).

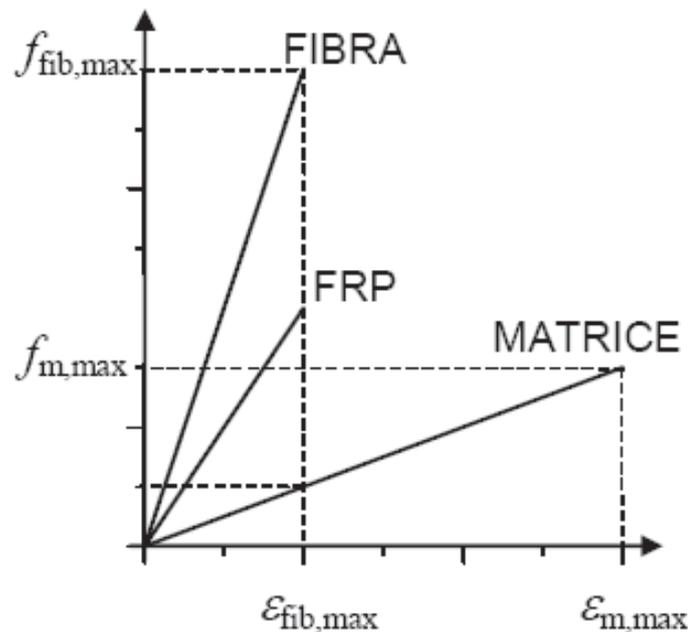


Fig. I.4 – Legami costitutivi di fibre, matrice e corrispondente composito.

I.3 FASE FIBROSA

La fase fibrosa rappresenta la parte del materiale composito cui spetta il ruolo di offrire la dovuta resistenza alle sollecitazioni. Le fibre possono avere un elevato modulo elastico (E), oppure una elevata resistenza meccanica (ci si riferisce solitamente alla resistenza a trazione). Le fibre si presentano sotto forma di filamenti oppure, come maggiormente accade, al fine di renderle più maneggevoli all'uso, si costruiscono veri e propri tessuti con svariate maglie, come si può notare dalla Fig.I.5

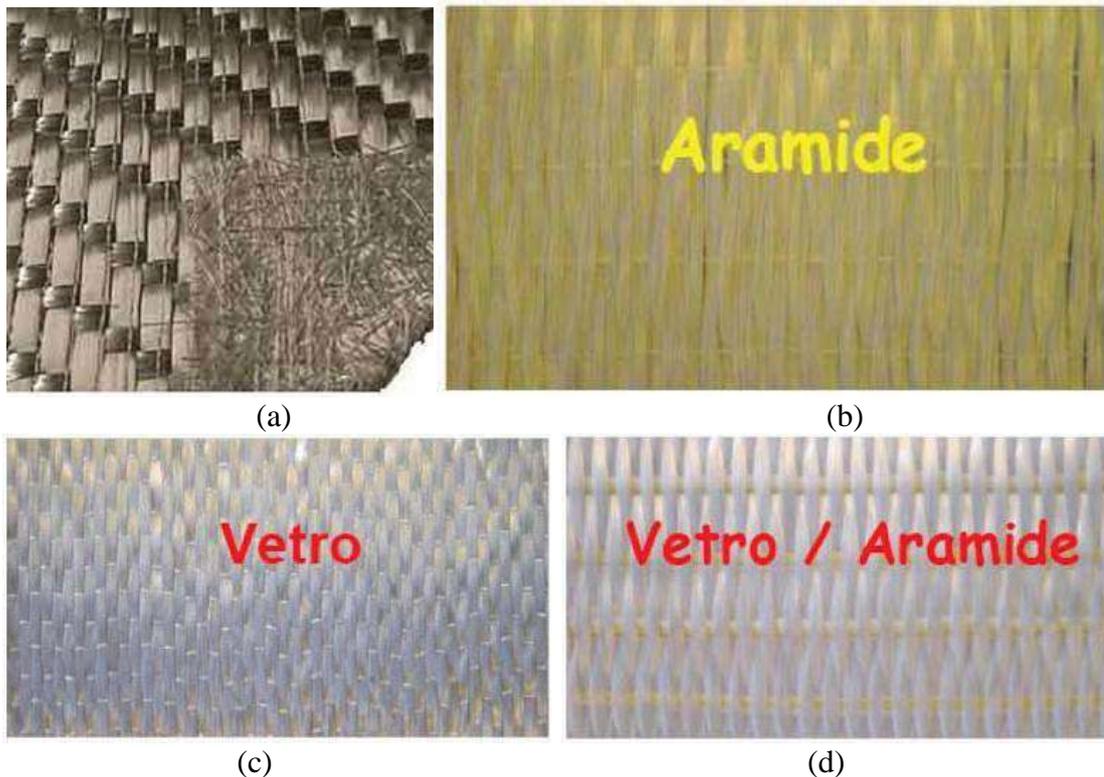


Fig. I.5 – a) Tessuto in fibre di Carbonio, b) Tessuto in fibre di Arammide, c) Tessuto in Fibre di vetro, d) Tessuto ibrido Vetro/Aramide

Un singolo strato di tessuto prende il nome di *lamina* mentre la sovrapposizione di più strati di tessuto viene detto *laminato*. A seconda che si adottino fibre lunghe o corte, si otterranno comportamenti differenti del materiale. Generalmente un filamento base di fibra ha un diametro di circa $10\mu\text{m}$ (10^{-6}m), un cavo, detto “*tow*”, è un fascio di migliaia di filamenti senza torsione che viene destinato ad essere avvolto in rotoli oppure strappato per essere adoperato come fibra discontinua. Il filato, o “*spun yarn*”, è l’insieme di filamenti tenuti insieme da torsione. Il filo assemblato, “*roving*”, è formato da filati senza una torsione intenzionale. Molte strutture dei tessuti fibrosi, così come molte tecniche di assemblaggio dei filamenti, provengono dall’industria tessile.

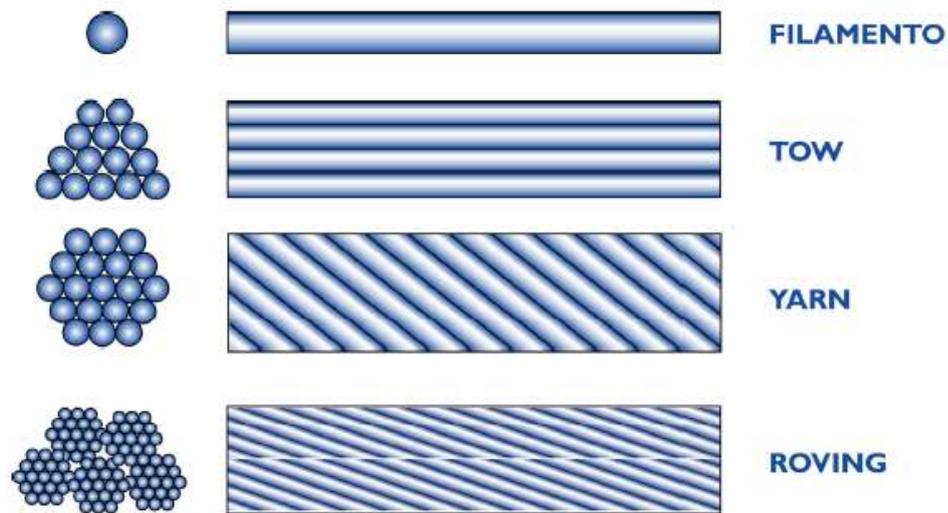


Fig. I.6 – Tipologie di Fibre

Le fibre più utilizzate per la realizzazione di materiali compositi sono:

- fibre di vetro;
- fibre di carbonio;
- fibre aramidiche.

La particolare geometria filiforme conferisce a tali materiali caratteristiche di rigidità e di resistenza molto più elevate di quelle possedute dagli stessi materiali quando utilizzati in configurazione tridimensionale e ciò è dovuto alla minore densità di difetti che compete alla configurazione monodimensionale rispetto a quella tridimensionale.

Le fibre sono costituite da filamenti continui molto sottili e quindi difficili da manipolare singolarmente; esse sono presenti in commercio sotto varie forme. Oltre che in forma di “*Yarn*” o di “*Roving*”, viste in precedenza, le fibre sono anche disponibili in commercio in composizioni arrangiate in modo da formare una grande varietà di tessuti.

I tessuti si distinguono in:



- unidirezionali (uniassiali): le fibre sono orientate tutte nella direzione della lunghezza e tenute insieme da una trama leggera di tipo non strutturale;
- bidirezionali: costituiti da una tessitura trama-ordito ortogonale di solito bilanciata (stessa percentuale di fibre nelle due direzioni);
- multi assiali: le fibre sono orientate in diverse direzioni del piano.

I tessuti per il rinforzo strutturale sono comunemente distribuiti allo stato secco ed in rotoli da utilizzare per l'impregnazione in cantiere con apposite resine.

Di seguito è fatta una descrizione delle principali famiglie di fibre adottate nel campo dell'ingegneria civile per la realizzazione di materiali compositi. Si tenga presente che un materiale composito può essere formato anche da più tipi di fibre.

I.3.1 FIBRE DI VETRO

Le fibre di vetro sono le più diffuse nell'ambito civile dato l'ottimo rapporto qualità-prezzo, inoltre godono di un'ottima resistenza, un ottimo isolamento, una bassa rigidità e una dilatazione termica simile a quella dell'acciaio. Queste fibre, tuttavia, esibiscono un modulo di elasticità normale inferiore a quello delle fibre di carbonio o aramidiche ed offrono una resistenza all'abrasione relativamente modesta, che richiede una certa cautela nelle operazioni di manipolazione prima dell'impregnazione. Presentano, infine, una certa attitudine allo scorrimento viscoso ed una modesta resistenza a fatica. 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. Al variare dei composti presenti nella pasta fusa si ottengono diverse classi di "Fiber Glass", di seguito descritte:



- *E-Glass*, costituite da silicati di calcio ed il loro uso è previsto ove vi fosse la necessità di avere proprietà elettriche;
- *S-Glass*, costituite da silicati di magnesio, la loro caratteristica fondamentale è l'elevata resistenza;
- *C-Glass*, costituite da carbonato di sodio-calce-borosilicato, si adoperano prevalentemente in ambienti acidi, in cui si teme una elevata corrosione;
- *AR-Glass*, costituite da ossido di zirconio e il loro punto di forza è quello di mantenere una elevata resistenza meccanica anche in ambienti alcalini, queste fibre si prestano ad essere utilizzate con una matrice a base di calcestruzzo.

Nella tabella seguente sono riportate le proprietà dei vari tipi di fibra di vetro:

Tipo di fibra	Modulo di elasticità (GPa)	Resistenza a trazione (GPa)	Deformazione ultima (%)	Densità (g/cm ³)	Coefficiente di dilatazione termica longitudinale	Massima Temperatura di esercizio (°C)
E-Glass	72	3,5	4,4	2,5-2,6	5,04-5,4	550
S-Glass	85	4,8	5,3	2,46-2,4	1,6-2,9	650
C-Glass	69	3,3	4,8	2,56	6,3	600
AR-Glass	55	2,5	4,7	2,14	3,06	477

Tabella 1.1: Proprietà delle varie fibre di vetro

Le proprietà generali della fibra di vetro si possono così sintetizzare:

- alta resistenza ($\sigma \cong 2000 \div 3000 \text{MPa}$);
- bassa rigidità ($E_G \cong 70 \div 90 \text{GPa}$);
- alta deformazione ultima ($\epsilon_G \cong 3 \div 5\%$);
- coefficiente di dilatazione termica simile a quello dell'acciaio e del calcestruzzo;
- degrado a temperature superiori agli 800°C;
- bassa resistenza a fatica;
- molto sensibili ad ambienti alcalini ed all'umidità;
- altamente isolanti.



Fig. I.7- Tipici rotoli di fibre di vetro

I.3.2 FIBRE DI CARBONIO

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. Esibiscono un comportamento a rottura fragile caratterizzato da un assorbimento di energia relativamente modesto anche se le tensioni di rottura sono elevate. A confronto con le fibre di vetro e con quelle aramidiche, le fibre di carbonio, risultano le meno sensibili ai fenomeni di scorrimento viscoso (*creep*) e di fatica e sono contraddistinte da una modesta riduzione della resistenza a lungo termine.

La struttura cristallina della grafite è di tipo esagonale, con gli atomi di carbonio organizzati in strutture essenzialmente planari, tenute insieme da forze trasversali di interazione del tipo *Van der Waals*, di gran lunga più deboli rispetto a quelle che agiscono tra gli atomi di carbonio nel piano. Per tale motivo il loro modulo di elasticità normale e la loro resistenza sono estremamente elevati nelle direzioni contenute nei suddetti piani, mentre risultano notevolmente inferiori nella direzione trasversale (comportamento anisotropo). La struttura delle fibre di carbonio non è completamente cristallina come quella della grafite. Il termine “*fibre di grafite*” viene tuttavia utilizzato nel linguaggio comune, anche se in modo improprio,

per indicare fibre con un contenuto di carbonio maggiore del 99%; il termine “*fibre di carbonio*” indica, invece, fibre con un contenuto di carbonio variabile tra l’80 ed il 95%.

Gli FRP a base di fibre di carbonio si denotano di solito con l’acronimo CFRP.

Si è visto che, le principali proprietà delle fibre di carbonio sono:

- resistenza e rigidità elevate;
- bassa deformabilità ultima;
- basso coefficiente di dilatazione termica;
- termicamente stabili fino a 2000°C;
- bassa resistenza all’impatto;
- elevata resistenza ad aggressioni chimiche ed all’umidità;
- corrosione galvanica se accoppiate con metalli;
- altamente conduttive;
- $E_c=290\div340\text{GPa}$;
- $f_c=2400\div5700\text{MPa}$;
- $\epsilon_{cu}=0,3\div1,8\%$.



Fig. I.8- Tipici rotoli di fibre di carbonio

I.3.3 FIBRE ARAMMIDICHE

Le arammidiche sono fibre di natura organica, costituite da poliammidi aromatiche in forma estremamente orientata. Introdotte per la prima volta nel 1971, esse si distinguono per l'elevata tenacità e per la loro resistenza alle operazioni di manipolazione. Il modulo di elasticità normale e la resistenza a trazione sono intermedi tra quelli delle fibre di vetro e quelle di carbonio (Fig. I.9).

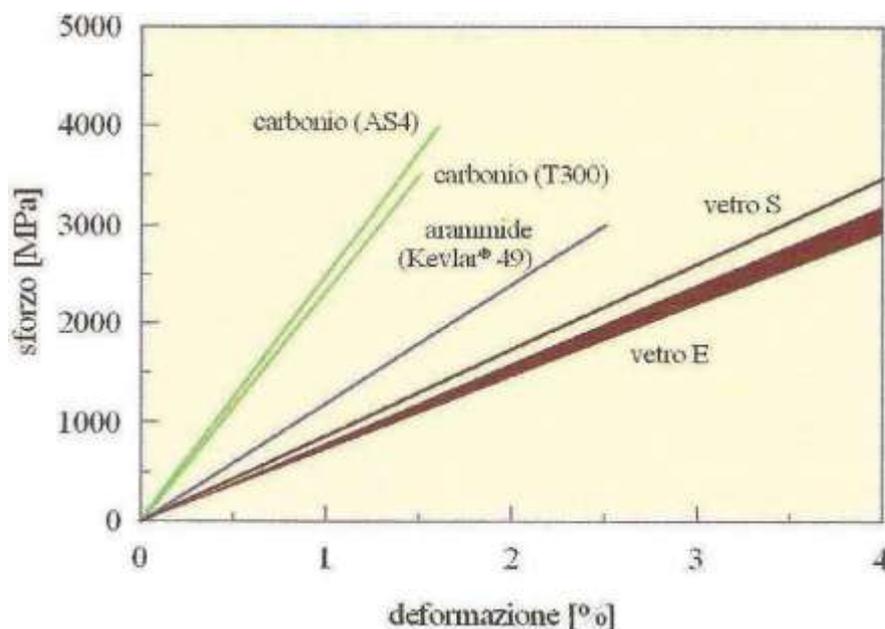


Fig. I.9 – Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo del comportamento a trazione monoassiale

La loro resistenza a compressione è di norma pari a circa 1/8 di quella a trazione: infatti, a causa dell'anisotropia della struttura della fibra, i carichi di compressione favoriscono lo snervamento localizzato con conseguente instabilità e formazione di piegature (*kinks*).

Le fibre arammidiche possono degradarsi per l'esposizione prolungata alla luce solare, con perdita della resistenza a trazione fino al 50%, inoltre, possono risultare sensibili all'umidità.

Il comportamento viscoso (*creep*) è simile a quello delle fibre di vetro, ma rispetto a queste ultime, la resistenza a rottura è molto più elevata. Anche la resistenza a fatica flessionale è più elevata di quella delle fibre di vetro. La tecnologia di produzione di codeste fibre si basa



sull'estrusione ad alta temperatura ed alta velocità del polimero in soluzione, con successivo raffreddamento veloce (*quenching*) ed essiccamento. La sintesi del polimero viene effettuata a monte dell'apparecchiatura di estrusione con l'impiego di soluzioni acide.

È possibile sottoporre le fibre così prodotte ad un trattamento di orientazione a caldo per avvolgimento su bobine rotanti ad elevata velocità (*post-spinning*) allo scopo di migliorarne le caratteristiche meccaniche.

Gli FRP a base di fibre aramidiche si denotano con l'acronimo AFRP.

Sinteticamente le principali proprietà sono:

- non lineari, duttili in compressione;
- buona resistenza agli agenti chimici;
- suscettibili ai raggi UV;
- T° di utilizzo: $-200^{\circ} \div +200^{\circ}\text{C}$;
- bassa conducibilità elettrica;
- $E_A=62\div 142$ GPa;
- $f_A=2410\div 3150$ MPa;
- $\varepsilon_{Au}=1,5\div 4,4\%$.



Fig. I.10 - Tipici rotoli di fibre aramidiche



I.4 FASE MATRICE

La fase matrice ha il compito di trasferire gli sforzi fra la struttura circostante e le fibre in essa immerse, ed inoltre quello di proteggere quest'ultime da urti meccanici e da danni ambientali.

Altre proprietà a cui devono soddisfare sono:

- avere un allungamento a rottura maggiore rispetto a quello delle fibre;
- mantenere le fibre separate fra loro, per evitare il formarsi di fessure;
- essere chimicamente e termicamente compatibili con le fibre per un lungo periodo.

Durante l'esercizio, un composito è soggetto a sollecitazioni taglienti dirette in maniera perpendicolare al piano, e azioni taglienti interlaminari agenti nel piano del materiale. Nell'uno e nell'altro caso, la resistenza del materiale composito è fornita dalla matrice, inoltre la stessa offre una resistenza alla deformazione laterale delle fibre sottoposte a carichi di compressione.

La matrice è un prodotto chimico di sintesi appartenente alla categoria dei polimeri che sono dei composti chimici, principalmente di natura organica (Fig. I.11). Esistono dei polimeri naturali come la cellulosa, il caucciù, gli enzimi e le proteine, a questi negli ultimi decenni si sono affiancati i polimeri di sintesi come, gomme, fibre tessili, etc.



Fig. I.11 - Matrice



Le matrici si suddividono principalmente in:

- *Matrici Termoindurenti* (non possono essere deformate dopo la polimerizzazione, es.: le resine);
- *Matrici Termoplastiche* (possono essere deformate dopo la polimerizzazione).

I.4.1 RESINE

La scelta della *resina* dipende dal tipo di sistema adottato, anche se quelle più diffuse in commercio risultano le matrici polimeriche a base di resine termoindurenti.

Esse si presentano in forma liquida o pastosa a temperatura ambiente e sono disponibili in forma parzialmente polimerizzata: infatti il materiale deve essere accuratamente miscelato a partire da diversi componenti (A e B : forniti separatamente e in un determinato rapporto quantitativo) per ottenere un prodotto polimerizzato (reticolato) ossia un materiale solido vetroso. Questa operazione solitamente viene eseguita direttamente in cantiere; per tale motivo richiede personale tecnico specializzato.

Le resine termoindurenti sono principalmente:

- *Resine epossidiche*: particolarmente indicate nel settore civile per le loro caratteristiche di buona resistenza all'umidità ed agli agenti chimici ed inoltre per le ottime proprietà adesive. E' una miscela in cui il reagente principale è il prepolimero epossidico (fluido viscoso) a cui viene aggiunto un agente reticolante;
- *Resine poliestere*: caratterizzate da una viscosità inferiore rispetto a quelle epossidiche, presentano più versatilità, ma le loro proprietà meccaniche e adesive sono solitamente inferiori rispetto a quelle epossidiche. Inoltre, un ulteriore svantaggio è la necessità di sciogliere la resina in un opportuno solvente in quanto essa si presenta in forma solida.



In particolare, le resine termoindurenti presentano i seguenti vantaggi:

1. sono caratterizzate da una bassa viscosità allo stato fluido e quindi da una relativa facilità di impregnazione delle fibre;
2. presentano ottime proprietà adesive;
3. sono possibili formulazioni che reticolano a temperatura ambiente;
4. hanno una buona resistenza agli agenti chimici.

Gli svantaggi invece sono:

1. ampiezza del campo di temperatura di esercizio limitato superiormente dalla temperatura di transizione vetrosa (temperature di esercizio piuttosto basse);
2. modesta tenacità a frattura (comportamento fragile);
3. sensibilità all'umidità in fase di applicazione alla struttura (tendenza ad assorbire umidità dall'ambiente).

I.5 TECNICA DI PRODUZIONE - PULTRUSIONE

La pultrusione, dall'inglese pull (tirare) + extrusion (estrusione), è un processo automatico e continuo di estrusione sotto trazione positiva, utilizzato per produrre materiali fibrorinforzati a matrice polimerica.

Le fibre di rinforzo, quali possono essere ad esempio la fibra di vetro e la fibra di carbonio, vengono prelevate dalla *cantra* e fatte passare attraverso un cosiddetto *bagno di impregnazione* dove vengono legati alla matrice della resina. Successivamente la trazione tira le fibre già impregnate della resina facendole passare attraverso un pettine con funzione di guida e imboccandole in una *stazione di preformatura*, che è una filiera non riscaldata che conferisce al profilato le dimensioni desiderate, schiacciando e compattando le fibre. Ora queste vengono fatte entrare in uno stampo riscaldato (*curing die*) avente la forma della

sezione del prodotto finale desiderato. L'alta temperatura del *curing die* favorisce la polimerizzazione della resina stessa. Questo cambio di temperatura non è però immediato: all'interno del forno sono infatti presenti 3 zone a differente temperatura (zona di preriscaldamento, zona di gelificazione, zona a elevata temperatura). All'uscita dal forno il profilato viene trasportato fino ad una *zona di taglio* dove viene opportunamente tagliato da lame che lo dimensionano. Alla fine della macchina di pultrusione troviamo il sistema di trazione, posto abbastanza lontano rispetto al forno di cura, in modo da permettere un raffreddamento ottimale al profilato, per evitare deformazioni in fase di ammassamento.

Un tipico impianto per la produzione di manufatti FRP è riportato nella Figura I.12.

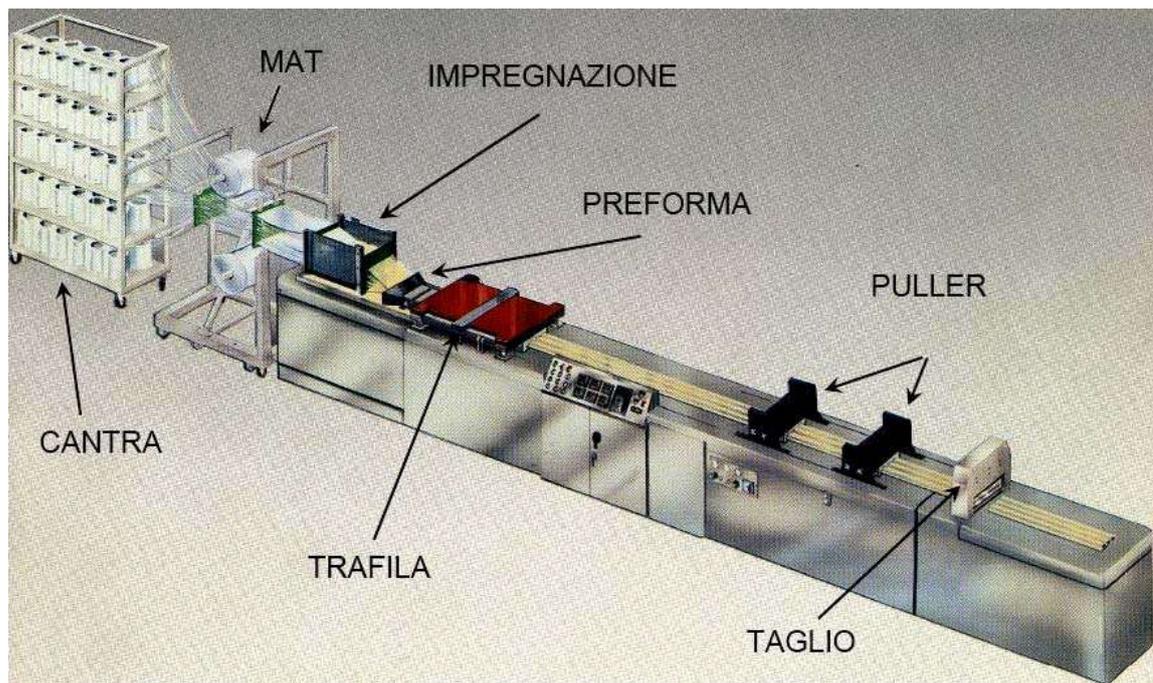


Figura I.12 – Schematizzazione del processo produttivo

Esso comprende:

- 1 - una stazione di svolgimento dalle bobine di fibra continua;
- 2 - un sistema di allineamento delle fibre;

- 3 - una vasca per l'impregnazione in resina delle fibre;
- 4 - una stazione di formatura e stagionatura dove viene rimossa la resina in eccesso e viene eseguita una stagionatura accelerata a caldo o a microonde per consentirne la rapida polimerizzazione;
- 5 - un sistema di cingoli o ganasce che servono ad esercitare ed applicare la forza di trazione e a consentire l'avanzamento del prodotto;
- 6 - una stazione di taglio del prodotto finito nella lunghezza voluta.

Con la tecnologia della pultrusione è possibile produrre profilati rettilinei in materiale composito che abbiano sezione di forma qualunque.

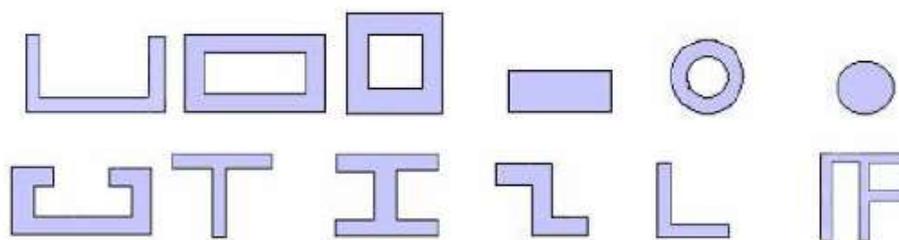


Figura I.13 - Alcuni esempi di sezioni realizzate con la tecnica della pultrusione

Inoltre il processo di pultrusione consente la produzione di manufatti caratterizzati da un allineamento e un' uniformità di distribuzione delle fibre pressoché perfetti e da un tasso di rinforzo (espresso come percentuale di volume di fibre rispetto al volume totale) elevatissimo e non raggiungibile con nessun' altra tecnologia.

Normalmente, un manufatto pultruso ha un tasso di rinforzo variabile tra il 50% e il 60% che è circa il doppio di quello che si può conseguire con tecniche di layout manuale. Inoltre, il tasso di rinforzo conseguibile e, quindi, le prestazioni finali del composito, sono controllabili

con estrema precisione. Il limite della pultrusione sta nella possibilità di realizzare esclusivamente manufatti a sezione costante e con fibre tutte orientate in un'unica direzione.

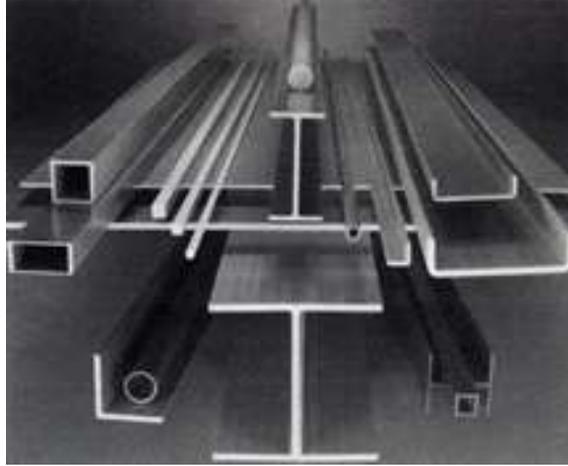


Figura I.14 – Materiali pultrusi

Pertanto, con questa tecnologia, vengono prodotti esclusivamente lamine, profilati e barre di varia sezione. Nel settore delle nuove costruzioni i manufatti pultrusi, sono soprattutto in vetroresina che è il materiale FRP più diffuso al mondo ed è costituito da fibre di vetro in una matrice di resina poliestere o vinilestere.

I. 6 BARRE DI FRP

Le barre di FRP esibiscono comportamento anisotropo e possono essere caratterizzate da differenti tipi di sezione trasversale (rettangolare, rotonda, piena o cava).

Esse sono realizzate principalmente mediante processi di pultrusione a cui possono seguire fasi di intrecciatura o tessitura di filamenti trasversali di fibre attorno alla sezione per produrre diversi sistemi atti ad assicurare una migliore aderenza barra-conglomerato cementizio.

Tra di essi si citano quelli per la produzione di nervature ottenute avvolgendo in modo elicoidale filamenti di fibre attorno alla sezione, la smerigliatura delle superfici della barra e le nervature in sola resina ricavate mediante stampaggio.



La disposizione di filamenti di fibre trasversali attorno alla sezione è di notevole importanza per il comportamento a taglio delle barre che, come tutti i laminati fibrorinforzati, presentano una bassa resistenza al taglio interlaminare, governata principalmente dalla matrice polimerica. Tali fibre sono abitualmente applicate a conclusione del processo di pultrusione. Una tecnologia alternativa, basata sull'utilizzo di strati di "mat" (ovvero un tessuto costituito da fibre corte orientate in modo casuale) permette di rinforzare la barra in direzione trasversale al proprio asse durante il processo di pultrusione. Attualmente le barre di FRP vengono utilizzate per lo più sotto forma di barre rettilinee singole o di griglie per la realizzazione di solette, muri e diaframmi. Infatti, rispetto alle barre metalliche, quelle di FRP presentano dei limiti di applicazione dovuti alle difficoltà di ottenere staffe o pezzi sagomati mediante piegatura. Tali elementi possono essere comunque prodotti per stampaggio in appositi impianti, ma nei limiti di determinate forme e dimensioni e con inevitabili costi aggiuntivi.

L'utilizzo delle resine termoplastiche sta introducendo nuove possibilità per ovviare ai suddetti inconvenienti ed i primi risultati sono decisamente promettenti rendendo le barre di FRP competitive con quelle metalliche anche sotto tale aspetto. Fattori quali il volume e l'orientamento delle fibre, la natura di queste ultime e della resina, gli effetti dimensionali ed il controllo di qualità durante la produzione svolgono un ruolo importante nella determinazione delle caratteristiche delle barre di FRP.



Figura I.15 – Tipologie di barre di FRP presenti in commercio

Le proprietà delle barre di FRP, quali le prestazioni ad elevate temperature, la resistenza alla corrosione, le proprietà dielettriche, l'inflammabilità e la conducibilità termica, sono funzione delle caratteristiche dei componenti.

I.6.1 PROPRIETA' FISICHE

I.6.1.1 COEFFICIENTE DI DILATAZIONE TERMICA

I coefficienti di dilatazione termica delle barre di FRP in direzione longitudinale, α_l , e trasversale, α_t , sono strettamente correlati a quelli delle singole fasi (matrice e fibre) che costituiscono il materiale composito. In particolare, al crescere della frazione volumetrica delle fibre, il valore del coefficiente α_l tende a quello delle fibre; in caso contrario, esso tende al valore del coefficiente di dilatazione termica della matrice. Valori tipici del coefficiente di dilatazione termica longitudinale e di quello trasversale, relativi a barre di composito con una

frazione volumetrica di fibre compresa tra il 50% ed il 70%, sono riportati nella seguente tabella:

Barra	α_t [$10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]	α_t [$10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]
AFRP	-6.0 ÷ -2.0	60.0 ÷ 80.0
CFRP	-2.0 ÷ 0.0	23.0 ÷ 32.0
GFRP	6.0 ÷ 10.0	21.0 ÷ 23.0

Tabella I.2 – Coefficienti di dilatazione termica

I valori elevati delle dilatazioni termiche trasversali, unitamente all'effetto Poisson nel caso di armature compresse, possono mobilitare notevoli tensioni circonferenziali di trazione nel ricoprimento ed innescare fessure in direzione radiale (Fig. I.16).

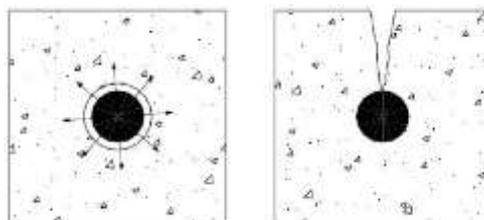


Fig. I.16 – Fessurazione indotta dalle tensioni circonferenziali

Queste ultime possono inficiare l'aderenza calcestruzzo-FRP con conseguenze indesiderabili sul comportamento strutturale, sia in condizioni di esercizio che ultime. Per evitare la formazione delle suddette fessure in conseguenza della dilatazione trasversale delle barre e lo sfilamento di queste ultime per effetto della loro contrazione trasversale, si suggerisce pertanto di adottare un ricoprimento di calcestruzzo adeguatamente consistente. Tuttavia, l'aderenza tra una barra di composito ed il calcestruzzo circostante è assicurata dalla mobilitazione di un sistema di tensioni interattive, dipendenti dalla geometria della barra, dalle proprietà chimico-fisiche della sua superficie e dalla classe di resistenza del calcestruzzo. Tale ultimo parametro è nel caso delle barre in FRP, meno influente che nel caso



delle barre di acciaio. La completa caratterizzazione del legame di aderenza richiederebbe l'esecuzione di specifiche prove di pull-out su campioni di barre.

1.6.1.2 EFFETTI DELLA TEMPERATURA

Al di sopra della T_g (temperatura di transizione vetrosa), il modulo elastico di un polimero si riduce significativamente a causa di una modifica della sua struttura molecolare. Il valore di T_g dipende dal tipo di resina, ma di solito è compreso in un intervallo che varia tra 65 e 120°C. In un materiale composito, le fibre che presentano migliori proprietà termiche rispetto alle resine, riescono a sostenere un certo carico in direzione longitudinale, finché non si raggiunge la temperatura limite. In ogni modo, a causa della riduzione del trasferimento degli sforzi tra le fibre, che dipende dalla resina, le proprietà del composito nel suo insieme tendono a deteriorarsi. Alcuni risultati sperimentali hanno dimostrato che temperature prossime ai 250°C, molto più alte dei valori di T_g delle resine, possono ridurre i valori della resistenza a trazione di GFRP e CFRP di oltre il 20% (Kumahara et al., 1983).

Uno degli aspetti importanti negli elementi in calcestruzzo armato con FRP, è la perfetta aderenza tra la barra e il calcestruzzo, in quanto ciò consente il trasferimento degli sforzi e la formazione di un corretto regime tensionale. L'aderenza può essere trasferita mediante i seguenti meccanismi interni: resistenza all'adesione dell'interfaccia, resistenza dovuta all'attrito all'interfaccia in conseguenza dello scorrimento, effetto cuneo per attrito, dovuto all'irregolarità (volute) della superficie.

Purtroppo l'evidenza sperimentale ci mostra che già a temperature prossime ai 100°C si ha una riduzione della resistenza a trazione in pull-out del 20-40%, e con temperature di 200°C si può arrivare a riduzioni anche del 80-90%.



Da ciò si evince, che l'utilizzo di materiali compositi in contesti in cui la resistenza al fuoco risulta un requisito primario è quantomeno non auspicabile, se non da escludere.

I.6.2 PROPRIETA' MECCANICHE

Le proprietà meccaniche di tali materiali dipendono principalmente dal tipo di matrice e dalla natura delle fibre, nonché dalla frazione volumetrica di queste ultime. Sulla base delle esperienze e delle conoscenze finora acquisite, le principali istruzioni sono limitate all'utilizzo di barre e griglie costituite da materiali compositi fibrorinforzati con matrici termoindurenti ed una frazione volumetrica di fibre non inferiore al 50%.

I.6.2.1. RESISTENZA E MODULO DI ELASTICITÀ A TRAZIONE IN DIREZIONE LONGITUDINALE

Gli FRP, quando sottoposti a sollecitazione (tipicamente sollecitazioni da trazione), manifestano un comportamento pressoché lineare, fino al livello di sollecitazione per cui si attinge il collasso del materiale stesso, tale comportamento provoca una rottura improvvisa e rende gli FRP "fragili". In Figura I.15 è mostrato un diagramma tensione-deformazione relativo ad alcune fibre utilizzate per gli FRP. Come si può notare dalla figura, le caratteristiche di resistenza meccanica delle fibre, e quindi degli FRP, sono di gran lunga superiori all'acciaio comunemente usato nel campo dell'edilizia (acciaio dolce); questa peculiarità però, va di pari passo con il deficit della *fragilità* della quale gli FRP sono affetti. Un materiale quando sottoposto a sollecitazione subisce una deformazione funzione del valore del modulo elastico; per quanto riguarda l'acciaio, vi è un punto detto *punto di snervamento*, per cui il materiale continua a resistere alla sollecitazione ad esso applicata con una deformazione pressoché costante, fino al punto di rottura, questo comportamento si indica col

nome di *comportamento plastico*. Un comportamento plastico ha il vantaggio di “avvisare” un prossimo collasso, questo non avviene per i materiali *fragili*, che al contrario manifestano una rottura improvvisa. Non v'è dubbio che operare nell'ambito civile con materiali i quali esibiscono rotture improvvisate è a dir poco rischioso, per cui la fase progettuale in quei lavori che richiedono l'impiego dei suddetti materiali è da condursi in maniera molto scrupolosa.

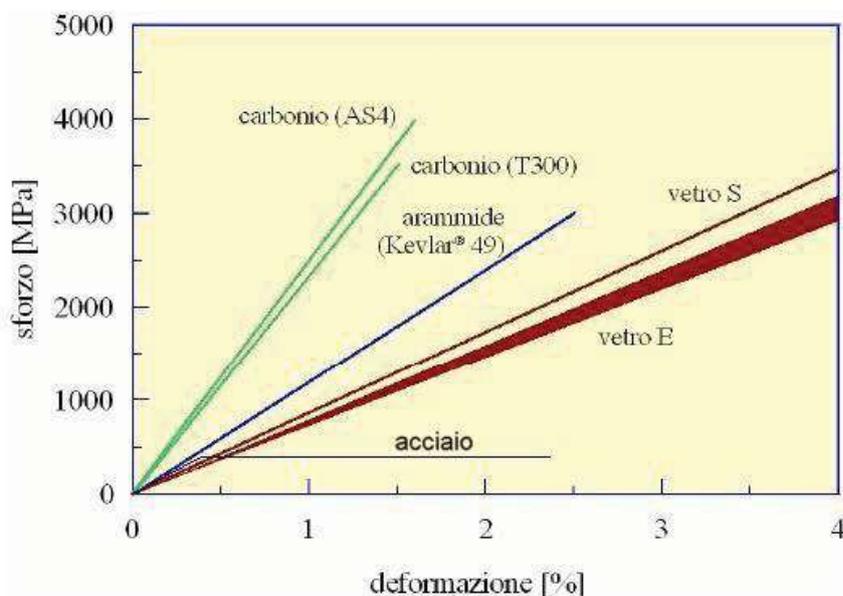


Fig. I.17 – Comportamento tensione-deformazione di alcune fibre e dell'acciaio

1.6.2.2 FATICA STATICA (CREEP RUPTURE)

Le armature di materiale composito fibrorinforzato sono sensibili al fenomeno della fatica statica (nota nella terminologia anglosassone come “creep rupture”), consistente in una progressiva diminuzione della resistenza in presenza di carichi di lunga durata. Tale fenomeno, di natura viscosa, risulta fortemente influenzato anche da fattori di tipo ambientale, quali temperatura ed umidità. Per mitigare gli effetti della viscosità ed evitare la rottura delle barre per *creep*, è raccomandato di limitare opportunamente le tensioni di esercizio in queste ultime.

E' possibile determinare sperimentalmente le caratteristiche meccaniche dei compositi.

Esistono degli istituti volti alla regolamentazione dei processi di prova dei materiali sia in ambito comunitario e nazionale (EN-UNI), che in ambito internazionale (ASTM), i quali prescrivono le specifiche da seguire per una buona riuscita e un'ottima affidabilità dei dati ottenuti. La prova maggiormente utilizzata per la caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei compositi è la prova di trazione unidirezionale (Fig.I.18). Da tale prova è possibile ottenere i valori del modulo elastico, E , del modulo di Poisson, G , nonché i valori di tensione e deformazione a rottura del materiale.



Fig. I.18 – Flat Coupon test

I.7 GRIGLIE DI FRP

Le griglie di FRP hanno la peculiarità di essere molto leggere, esibire elevate resistenze meccaniche e di non essere sensibili ai fenomeni corrosivi.

Esse sono impiegate, generalmente, per il rinforzo interno di elementi di calcestruzzo in sostituzione o in aggiunta alle armature tradizionali d'acciaio, quali barre e/o reti elettrosaldate. A differenza di queste ultime, le griglie presentano l'ulteriore pregio di poter

essere posizionate ad una distanza esigua dall'estradosso dell'elemento strutturale, non necessitando dello strato di calcestruzzo protettivo nei confronti della corrosione.

La disposizione di griglie di FRP negli elementi strutturali contribuisce al contenimento della fessurazione a carico del calcestruzzo.

Le griglie di FRP sono commercializzate in rotoli e sono contraddistinte dalla spaziatura delle maglie e dalle competenti aree resistenti.

I valori delle proprietà geometriche e meccaniche delle griglie possono essere ricavati con le stesse modalità indicate per le barre singole. In particolare, in assenza di adeguate sperimentazioni ed a vantaggio di sicurezza, le proprietà di aderenza di una griglia di FRP possono essere assimilate a quelle delle singole barre costituenti.

I.8 STAFFE DI FRP

Le staffe di FRP si ottengono piegando le barre di FRP, comportando la riduzione significativa della resistenza in corrispondenza delle zone di piegatura. In queste zone la staffa resiste ai carichi laterali dovuti al contattato con il cemento, oltre alle sollecitazioni nella loro direzione longitudinale parallela alla direzione delle fibre. La Figura I.19 mostra le sollecitazioni agenti nella zona piegata della staffa di FRP.

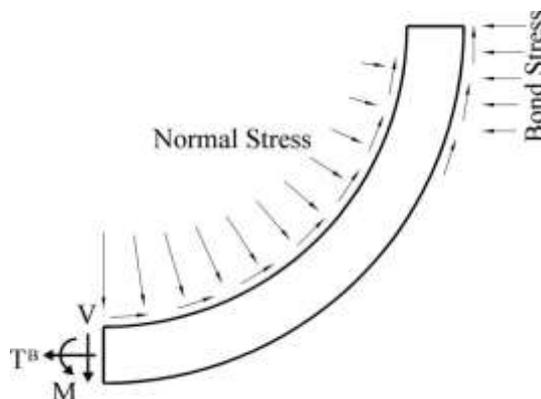
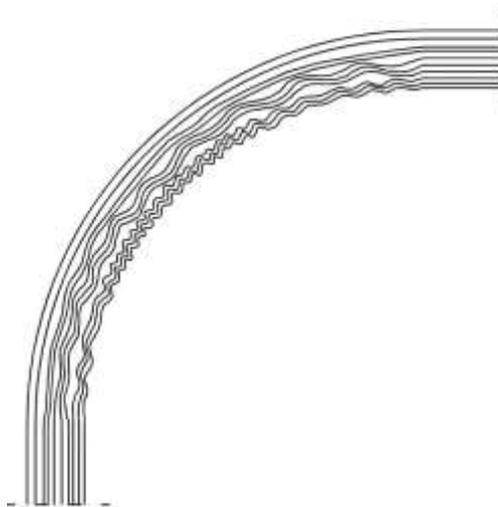


Fig. I.19 Sollecitazioni nella zona curva delle staffe di FRP

Inoltre, la piegatura della barra di FRP causa la deformazione (attorcigliamento, strozzatura) delle fibre più interne rispetto a quelle più esterne come mostrato in Figura I.20.



(a)



(b)

Fig. I.20 Attorcigliamento delle fibre più interne nella zona curva delle staffe di FRP:

(a) fibre nude dopo la rimozione della resina;

(b) disegno schematico dell'orientamento delle fibre in corrispondenza della piegatura.

La debolezza intrinseca delle fibre perpendicolari al loro asse, accompagnata dalle fibre attorcigliate in corrispondenza della parte interna della piegatura, contribuiscono a ridurre la resistenza delle staffe in FRP rispetto alle barre rettilinee. Dunque la resistenza a trazione della parte piegata è significativamente inferiore a quella della parte rettilinea (così come mostrato dagli studiosi: Maruyama et al. 1993; Ehsani et al. 1993, 1995; Ishihara et al. 1997;

Shehata et al. 2000) e ciò è da attribuire alla concentrazione delle sollecitazioni in quella zona e alla debolezza intrinseca delle fibre perpendicolari all'asse della staffa.

La capacità di piegatura delle barre in FRP è influenzata da molteplici fattori: alcuni di questi correlati al processo di produzione come la piegatura, l'allineamento delle fibre e i meccanismi di postindurimento; altri fattori sono inerenti alla configurazione della staffa stessa come il rapporto tra il raggio di curvatura e diametro della barra (r_b/d_b), il tipo e il contenuto di fibre di rinforzo [American Concrete Institute (ACI) 2006].

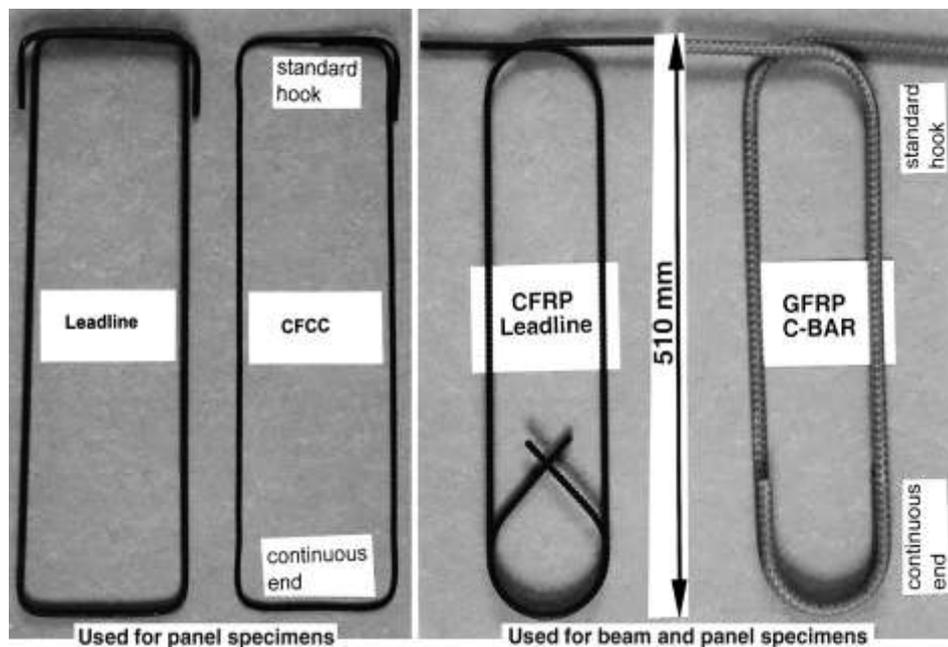


Fig. I.21 – Tipiche staffe in FRP



CAPITOLO II

APPROCCIO NORMATIVO

Questo capitolo affronta la problematica dell'approccio normativo.

Sono attualmente disponibili, in campo internazionale, Istruzioni e/o Linee Guida di ausilio alla progettazione, esecuzione e controllo di strutture in FRP.

In particolare, le Istruzioni e/o Linee guida attualmente disponibili sono riconducibili a sei documenti, che sono:

1. CNR_DT203/2006;
2. Task Group 9.3, 2005;
3. American Concrete Institute: ACI 440.1R-03, 2003;
4. CAN/CSA-S6-02, 2002 per edifici;
5. CAN/CSA-S6-00, 2000 per ponti;
6. Documento Giapponese: JSCE, 1997.

Tutti i documenti, sopra elencati, utilizzano il metodo semiprobabilistico agli stati limite per le verifiche di resistenza delle sezioni. Noi faremo riferimento, in particolar modo, al CNR per le barre in FRP e all'ACI 440 per le staffe in FRP.

II.1 LINEE GUIDA CNR-DT 203/2006

Le presenti Istruzioni del CNR, sono state redatte sulla base dello stato attuale delle conoscenze recependo anche i risultati e l'esperienza acquisiti nel corso degli studi teorico-sperimentali relativi ad una serie di progetti di ricerca sui materiali compositi, finanziati in campo nazionale.



Lo scopo delle *Istruzioni* è quello di fornire, nell'ambito della Normativa Vigente, un documento di tipo orientativo *per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Armato con Barre di Materiale Composito Fibrorinforzato*: l'approccio seguito è quello del metodo semiprobabilistico agli stati limite; l'impostazione adottata, quella dei 'principi' e delle 'regole applicative', nello stile classico degli Eurocodici.

E' opportuno evidenziare che gli elementi di conglomerato cementizio armato con barre di FRP hanno un comportamento essenzialmente elastico, per cui non sono applicabili quei metodi dell'analisi strutturale che presuppongono una capacità di redistribuzione plastica. Conseguentemente, un'attenzione particolare è richiesta per le applicazioni in zona sismica, laddove deve essere tenuta in debita considerazione la quasi totale assenza di duttilità nelle strutture così realizzate.

A tal riguardo, nel caso di elementi strutturali primari, cui sia affidata la funzione di fronteggiare l'azione sismica, il progetto deve essere sviluppato in campo elastico, attribuendo un valore opportunamente contenuto al fattore di struttura.

Si evidenzia:

1. Formano oggetto del presente documento le strutture di calcestruzzo con armatura lenta di FRP. Non è esclusa la possibilità che alcune delle membrature di tali strutture presentino un'armatura di tipo tradizionale, interamente realizzata con barre di acciaio.
2. I principi e le regole applicative contenute nel documento non sono direttamente applicabili alle strutture precomprese con cavi di precompressione di FRP.

Applicazioni siffatte sono state comunque già sviluppate in diversi Paesi e necessitano di verifiche specifiche soprattutto in funzione della tecnica di precompressione e dei sistemi di



ancoraggio adoperati, nonché dei criteri di resistenza dei materiali, in particolare con riferimento agli effetti a lungo termine sotto stati tensionali elevati.

II.1.1 CARATTERIZZAZIONE DELLE BARRE DI FRP

II.1.1.1 - CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA

La prova di seguito descritta consente la caratterizzazione della sezione equivalente associata alla generica barra di composito. L'iter della prova richiede il confezionamento di almeno cinque provini di lunghezza pari a 200 mm, preventivamente condizionati secondo la procedura A relativa allo standard ASTM D 618.

Nel dettaglio, tale procedura prescrive per i provini con diametro inferiore o uguale a 7 mm un condizionamento per almeno 40 ore alla temperatura di 23 °C e con un'umidità relativa del 50%; per quelli con diametro superiore a 7 mm un condizionamento per almeno 88 ore nelle medesime condizioni ambientali.

La sperimentazione deve essere condotta in condizioni ambientali standard: temperatura di 23 ± 3 °C e umidità relativa del $50\pm 10\%$, previa stagionatura dei provini di almeno 24 ore nel laboratorio stesso.

La prova consiste essenzialmente nell'immergere la barra di composito in un cilindro graduato pieno di acqua, o di etanolo nel caso si riscontri la formazione di bolle d'aria in prossimità della superficie del provino, e nel misurare l'incremento di volume del fluido a seguito dell'immersione.

Il cilindro adottato deve presentare un'altezza sufficiente a contenere l'intera barra e a garantire un opportuno franco per la misura della variazione di volume. Inoltre esso deve essere graduato con un intervallo di misura non inferiore a 10 ml. Al fine di valutare l'area della sezione equivalente associata alla barra testata, A_p , è necessario determinare la sua



lunghezza media, l_p . Quest'ultima è assunta pari al valore medio delle lunghezze di tre generatrici, sfalsate rispettivamente di 120° . La misura di tali lunghezze deve essere effettuata con un calibro, di precisione almeno pari a 0.025 mm.

Nota la lunghezza media dei provini l_p , si può valutare l'area della sezione equivalente

competente alla generica barra in esame utilizzando la relazione: $A_p = \frac{V_1 - V_0}{l_p}$

dove V_0 e V_1 sono, rispettivamente, il volume iniziale e finale del liquido, quest'ultimo misurato a seguito dell'immersione del composito. Eseguendo la prova di immersione per tutti i campioni di FRP confezionati, si giunge alla definizione del valore medio dell'area equivalente della sezione retta, A_b , che caratterizza pertanto la geometria della barra di FRP.

Il corrispondente diametro viene indicato, per analogia, con il simbolo d_b .

II.1.1.2 - CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

Nel presente paragrafo è descritta nelle sue linee essenziali la prova di identificazione delle proprietà meccaniche di trazione di una barra di composito. Anche per l'esecuzione di questo test sono previste condizioni ambientali standard di laboratorio: temperatura di 23 ± 3 °C e umidità relativa del $50 \pm 10\%$.

È inoltre richiesto il confezionamento di almeno cinque provini di FRP, preventivamente condizionati secondo la procedura A relativa allo standard ASTM D 618 e stagionati in laboratorio per almeno 24 ore.

La lunghezza dei provini da testare, l_p , deve soddisfare i seguenti requisiti:

- $l_p \geq 100 + 2 \cdot l_a$ [lunghezze in mm]

- $l_p \geq 40 \cdot d_b + 2 \cdot l_a$ [lunghezze in mm]

essendo le variabili: l_a e d_b , rispettivamente, la lunghezza di afferraggio ed il diametro della barra o valutato in accordo con quanto definito al paragrafo precedente.

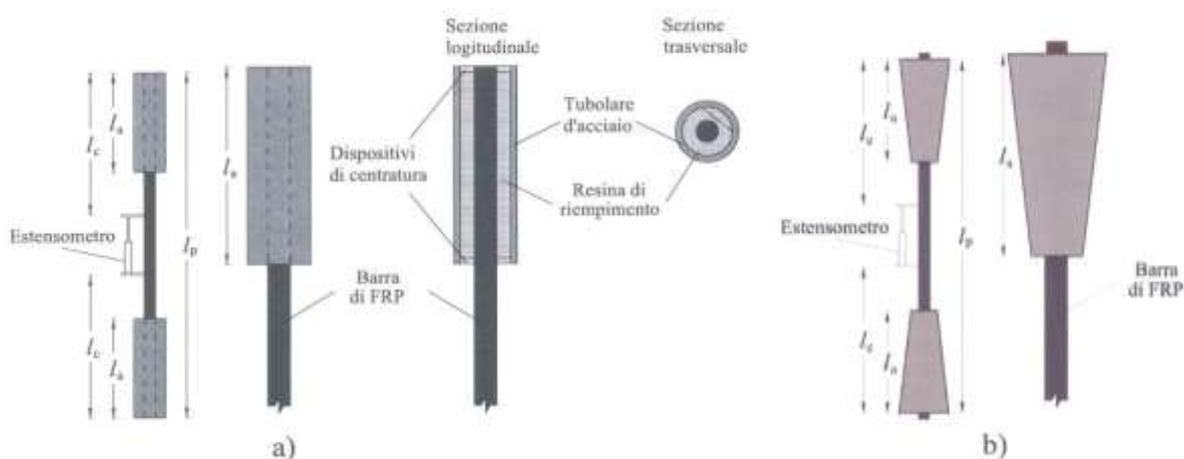


Figura II.1 – Dispositivi di afferraggio delle barre per test di trazione

La forma e le dimensioni dei dispositivi di afferraggio, in particolare la loro lunghezza, l_a , devono garantire che la rottura del provino avvenga al di fuori di essi, nella zona di lunghezza pari al valore di riferimento: $l_p - 2 \cdot l_a$.

La caratterizzazione delle barre viene condotta mediante una prova monotona di trazione a controllo di forza, di deformazione o di spostamento. I requisiti richiesti per il dispositivo di trazione sono una risoluzione di 100 N, nel caso di prova in controllo di forza, di 0.01 %, nel caso di prova in controllo di deformazione, e di 0.001 mm, nel caso di prova in controllo di spostamento.

Il gradiente di applicazione del processo di carico, di deformazione o di spostamento, deve essere costante per tutta la durata del test e di entità tale da garantirne l'espletamento in un intervallo di tempo compreso tra 1 e 10 minuti.



Le deformazioni esibite dalle barre nel corso della prova possono essere misurate in corrispondenza della sezione di mezzeria mediante estensimetri o estensometri. In quest'ultimo caso è richiesta una precisione non inferiore a 0.02 % della base di misura, la quale non può essere inferiore a otto volte il diametro equivalente della barra (riferimento a $8 d_b$). Al termine di ciascuna prova si può pervenire ad un diagramma forza-deformazione da cui è desumibile la tensione di rottura, $f_{fu,p}$, mediante la relazione: $f_{fu,p} = \frac{F_{fu,p}}{A_b}$ dove le variabili: $F_{fu,p}$ ed A_b rappresentano, rispettivamente, la forza di rottura registrata e l'area del provino. Il modulo di elasticità normale a trazione, $E_{f,p}$, può essere determinato operando una regressione lineare sui dati acquisiti nell'intervallo compreso tra il 20% e il 50% della tensione di rottura, oppure, in alternativa, ricorrendo alla seguente formula semplificata:

$$E_{f,p} = \frac{F_1 - F_2}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot A_b}$$

in cui con F_1 ed ε_1 si sono indicate, rispettivamente, la forza e la deformazione corrispondenti al 50% della tensione di rottura; con F_2 ed ε_2 , rispettivamente, la forza e la deformazione corrispondenti al 20% della tensione di rottura. La deformazione ultima del campione testato, $\varepsilon_{fu,p}$, può essere determinata attraverso la seguente relazione:

$$\varepsilon_{fu,p} = \frac{F_{fu,p}}{E_{f,p} \cdot A_b}$$

A partire dai parametri meccanici così ottenuti per i singoli provini, si può risalire agevolmente ai valori caratteristici delle proprietà meccaniche della barra di FRP.

II.1.1.3 - SCHEDA TECNICA TIPO PER LE BARRE DI FRP

Di seguito viene proposta la struttura di una scheda tecnica tipo, per le barre di FRP.

Le schede tecniche delle barre di FRP attualmente in commercio potrebbero includere anche altre informazioni o riportare solo parte di quelle appresso indicate.

La struttura individuata risulta comunque esaustiva per numero e tipo di informazioni fornite dal fornitore.

SCHEDA TECNICA: barre di FRP per armatura ordinaria di strutture di cemento armato			
IL PRODUTTORE DEVE RIPORTARE I VALORI STATISTICI NECESSARI PER LA VALUTAZIONE DELLE RESISTENZE CARATTERISTICHE (AD ESEMPIO MEDIA, SCARTO QUADRATICO MEDIO, POPOLAZIONE, FRATILE, INTERVALLO DI CONFIDENZA).			
Descrizione			
Nome commerciale, tipo di fibra, tipo di resina, tecnologia di produzione, marchiatura ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.			
Caratteristiche geometriche e fisiche			
Proprietà	Unità di misura	Metodo di prova normativa di riferimento	Note
geometria della sezione delle barre		Appendice B	
area equivalente delle barre	mm ²	Appendice B	
perimetro equivalente delle barre	mm	Appendice B	(1)
colore			
densità	fibra	g/cm ³	ISO 1183-1:2004(E)
	matrice	g/cm ³	
contenuto di fibra	in peso	%	ISO 11667:1997(E)
	in volume	%	
temperatura di transizione vetrosa della resina (T _g)	°C	ISO 11357-2:1999(E) (DSC) ISO 11359-2:1999(E) (TMA) ASTM E 1640 (DMA)	
temperatura limite massima di utilizzo	°C		
conducibilità elettrica	S/m		
(1) Valore utile per il calcolo della lunghezza di ancoraggio nel caso di barre di sezione non circolare.			
(2) Valore utile per il calcolo della frazione in peso di fibra quando è nota quella in volume o viceversa.			
Proprietà			
Proprietà	Unità di misura	Metodo di prova normativa di riferimento	Note
modulo di elasticità normale a trazione	GPa	Appendice B / ISO 527-4,5:1997(E)	
resistenza a trazione (valore medio e caratteristico)	MPa	Appendice B / ISO 527-4,5:1997(E)	
deformazione a rottura a trazione	%	Appendice B / ISO 527-4,5:1997(E)	
resistenza a <i>creep</i>		ISO 899-1:2003(E)	(3)
rilassamento (barre, cavi)			(4)
aderenza: tensione tangenziale (barre, cavi)		prova di <i>pull-out</i>	(4)
%			
(3) La ISO 899-1:2003(E) è la Normativa di riferimento generale per la determinazione del comportamento a <i>creep</i> di materiali polimerici rinforzati (compositi) o non, mentre per le barre per armatura ed i cavi di precompressione è in preparazione una norma ISO (TC71/SC6N): "Non-conventional reinforcement of concrete - Test methods-Part 1: Fiber reinforced polymer (FRP) bars and grids" in cui è proposta una prova specifica per le barre di FRP ("Test Method for creep failure"). In alternativa esiste una prova proposta nel documento ACI 440.3R-04 "Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures" dal titolo: "Test Method for creep rupture of FRP bars"			
(4) Nella norma ISO (TC71/SC6N) riguardante barre e cavi di FRP sono proposte le due seguenti prove: "Test method for bond strength by pull-out testing" per l'aderenza e "Test Method for long-term relaxation" per il rilassamento. Prove analoghe sono previste nel documento ACI 440.3R-04			
Condizioni di Stoccaggio			
Descrizione			
Precauzioni d'uso e sicurezza			

Figura II.2 – Scheda tecnica tipo per barre di FRP



II.2 LINEE GUIDA ACI 440 E ASTM

Il documento ACI 440.3R-04 fornisce le metodologie per i test meccanici a breve e lungo termine, per quelli termo-meccanici e per quelli di durabilità delle barre di FRP e dei laminati. E' previsto che queste metodologie di prova vengano tenute in conto ed adottate con eventuali modifiche dai principali istituti americani di ratificazione come la ASTM International o la AASHTO.

PROPRIETA'	ASTM Test Method	ACI 440 Test Method	SOMMARIO DELLE DIFFERENZE
Area della Sezione Trasversale	---	B.1	Non esistono metodi di test dell'ASTM
Resistenza longitudinale a trazione e moduli	D 3916	B.2	Il metodo ACI fornisce informazioni dettagliate sull'ancoraggio delle barre nel dispositivo di prova. Il metodo ACI fornisce, anche, i requisiti procedurali per l'attaccamento e l'allungamento del dispositivo di lettura sulle barre.
Proprietà del legame cls-FRP	A 944	B.3	L'ASTM Pullout test C234, è stato ritirato, come normativa, perché non fornisce informazioni adeguate sulla dimensione del campione e per evitare lo splitting del cilindro di calcestruzzo armato con la barra di FRP. L'Unico metodo di prova ASTM rimasto per il test del legame con le barre di acciaio è il metodo A944 che non è stato modificato per l'utilizzo con barre FRP. I lavori in corso da parte del comitato ACI 440 prevedono di produrre metodi per il legame barra-calcestruzzo nelle travi.
Resistenza a taglio	D 5379 D 3846 D 2344 D 4475	B.4	Il metodo ACI si concentra sull'effetto spinotto delle barre e non si sovrappone agli altri metodi attuali dell'ASTM che si concentrano principalmente sulle modalità di



			rottura a taglio delle travi.
Capacità delle barre piegate	---	B.5	Non esistono metodi di test dell'ASTM
Proprietà di durabilità	---	B.6	Non esistono metodi di test dell'ASTM
Proprietà di fatica	D 3479	B.7	I metodi ACI forniscono informazioni specifiche sull'ancoraggio delle barre e sull'attaccamento del dispositivo di lettura dell'allungamento sulla barra. I metodi ACI richiedono anche calcoli specifici che non sono previsti nei metodi ASTM.
Proprietà di creep	D 2990	B.8	I metodi ACI forniscono informazioni specifiche sull'ancoraggio delle barre e sull'attaccamento del dispositivo di lettura dell'allungamento sulla barra. I metodi ACI richiedono anche calcoli specifici che non sono previsti nei metodi ASTM.

Tabella II.1 – Metodi di test per barre utilizzate come rinforzo per calcestruzzo.

Il comportamento meccanico degli FRP è diverso dal comportamento dell'acciaio. Gli FRP sono materiali anisotropi a causa dell'orientamento delle fibre, sia nelle barre che nei laminati, e sono caratterizzati da un'elevata resistenza a trazione solo nella direzione delle fibre, mentre in direzione trasversale la resistenza è trascurabile. Questo comportamento anisotropo influisce sulla resistenza al taglio, sull'effetto spinotto e sulla aderenza tra la barra e il calcestruzzo.



II.2.1 METODO DI PROVA A TRAZIONE DI BARRE IN FRP

Il metodo in esame è il D7205/D 7205M - 06 che di seguito chiamiamo *STD "STANDARD TEST METHOD (for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars)"*.

Va evidenziato che vi sono diverse procedure per determinare le proprietà di resistenza dei compositi a matrice polimerica e può essere trovata coi principali (più diffusi) metodi di prova: D3039, D3039M e D3916.

Gli elementi lineari utilizzati per il rinforzo del cemento (Portland) sono indicati come: barre, armature, aste, o tendini, a seconda della specifica applicazione. Il metodo di prova esaminato è applicabile a tutti i rinforzi, nei limiti definiti nel metodo.

I provini di prova sono indicati come barre in questo metodo di prova. In generale, le barre hanno solide sezioni e uno schema regolare di ondulazioni superficiali e/o un rivestimento di particelle incollate che promuovono un interblocco meccanico tra le barre ed il cemento stesso.

Il metodo di prova STD è anche adatto per l'uso con segmenti lineari strutturati a griglia. Dettagli specifici per la preparazione, la verifica di barre e griglie sono descritti nel seguente paragrafo. In alcuni casi, per prevenire i danni indotti alle estremità della barra e griglia, dal sistema di ancoraggio del provino, si adottano particolari accorgimenti che sono evidenziati nel prosieguo del paragrafo, con un'analisi dei dettagli per le ancore di fissaggio.

I valori di resistenza determinati col metodo STD, sono forniti mediante la definizione di punti di forza statica che non tengono conto del carico statico sostenuto o carico a fatica.

La caratterizzazione dei materiali aggiuntivi possono essere necessari, soprattutto per le barre che devono essere utilizzate in condizioni di carico sostenuto e ripetuto. Questo metodo



standard non ha la pretesa di affrontare tutti i problemi di sicurezza, se presenti, associati al suo uso.

E' comunque importante evidenziare, che i risultati ottenuti dalla prova STD consentono di stabilire adeguati valori di sicurezza strutturali e la determinazione di applicabilità nell'ambito dei limiti normativi prima della messa in esercizio.

Facciamo una sintesi delle fasi operative del metodo di prova; un polimero rinforzato con fibre (FRP), barre preferibilmente dotate con ancore, è montato in una macchina di prova meccanica e si analizza un singolo campione caricato in tensione fino alla rottura. Vengono registrate:

- Forza di rottura;
- Tensione longitudinale;
- Spostamento longitudinale.

Va evidenziato che vi sono metodi alternativi per fissare i campioni di prova alla macchina, ma deve essere possibile applicare tutta la forza alla barra di prova per portare la barra stessa alla rottura.

Il metodo STD di prova è stato progettato per avere in modo sperimentale, specifici dati, relativi alla resistenza a trazione e ad allungamento longitudinale. Dalla prova di trazione, si ottengono una serie di dati necessari per la progettazione.

I fattori che influenzano la resistenza di una barra, sono:

1. materiali costituenti la barra stessa;
2. caratteristiche specifiche del materiale di ogni elemento contenuto;
3. percentuali della composizione di rinforzo;
4. metodi di fabbricazione;
5. caratteristiche della fibra di rinforzo;



6. tipologia architettonica della fibra utilizzata.

Allo stesso modo, i criteri della prova per la misurazione sono:

1. risposta alla trazione delle barre;
2. preparazione dei campioni di prova;
3. condizionamento ambientale dei campioni di prova;
4. l'ambiente di test;
5. l'allineamento del campione nel test di prova;
6. la velocità del test di prova;
7. la direzione del test di prova;

In conclusione i parametri di progetto che possono essere ottenuti da questo metodo di prova sono:

- Resistenza alla Trazione;
- Sforzo di Rottura;
- Modulo Elastico alla Trazione;
- Curva "Sforzo-Deformazione".

Esaminiamo le interferenze che possono alterare la corretta misurazione dei parametri tecnici della procedura STD. Il criterio di fissaggio può causare guasti prematuri alla trazione delle barre. Infatti le ancore, se utilizzate, devono essere progettate in modo tale che la capacità di trazione completa può essere raggiunta senza che le stesse possano scivolare per tutta la lunghezza durante il test.

Il sistema di allineamento-piegatura eccessiva può causare una precoce rottura, così come un modulo altamente inesatto può essere la determinazione di elasticità. Ogni sforzo deve essere fatto per eliminare la flessione del sistema di prova.



La flessione potrebbe verificarsi a causa di disallineamento delle barre all'interno delle ancore o delle prese o dei sistemi di fissaggio associati, o dallo stesso campione di prova. Quindi è necessario installare correttamente le impugnature, evitare di trovarsi fuori tolleranza a causa di un campione di prova povero nella preparazione. La normativa E1012 riguarda la verifica dell'allineamento sotto carico di trazione per il campione di prova.

Valutiamo la dimensione della sezione trasversale della barra, che è misurata, immergendo per un periodo definito, il campione in acqua. Le barre, con struttura che intrappolano l'aria durante l'immersione (a parte piccole porosità) non possono essere valutate utilizzando questo metodo. Questo metodo potrebbe non essere appropriato per le barre che hanno grandi variazioni di sezione trasversale per tutta la lunghezza della barra stessa.

II.2.2 CAMPIONAMENTO E TEST

Aspetto importante per ottenere dei risultati di prova affidabili, sono: il campionamento e i provini da verificare.

1. Il campionamento, richiede almeno cinque provini;
2. Per dati statisticamente significativi, la procedura utilizzata è il metodo di campionamento.

Ora esaminiamo i vari punti fondamentali che sono le operazioni di campionamento e test.

Come geometria s'intende la lunghezza totale del campione, tale lunghezza deve essere la lunghezza libera più due volte la lunghezza di ancoraggio. La lunghezza libera tra le ancore, L , non deve essere inferiore a 380 mm né meno 40 volte il diametro della barra efficace. La lunghezza del campione nella morsa e gli ancoraggi (se utilizzata) è sufficiente per un ancoraggio adeguato.

La Etichettatura dei campioni deve essere eseguita in modo d'avere un storico della prova:



1. Etichettatura del provino prima della prova;
2. Etichettatura dopo ogni operazione;
3. Ogni etichettatura deve avere le informazioni di prima e dopo il singolo test.

La precisione di tutte le apparecchiature di misura deve essere certificata.

I principi fondamentali della metodologia di misurazione sono:

- Procedura C del metodo di prova D5229 / D5229M;
- Conservare a norma in atmosfera di laboratorio (23 ± 3 °C e $50 \pm 10\%$ RH) a meno che un ambiente di condizionamento sia diverso ed è specificato come parte dell'esperimento.

I parametri da specificare nella procedura sono:

- Il metodo di campionamento dei provini che è per: tipo di campione e geometria;
- Le caratteristiche di trazione e trasmissione dei dati aggregati in formato standard.

Per determinare le proprietà specifiche di un materiale, è necessario definire prima della prova, la strumentazione adeguata e le attrezzature dei dati di registrazione.

Va stimato il valore dello stress e i livelli di tensione di funzionamento per selezionare il trasduttore, la taratura delle apparecchiature, e la determinazione delle impostazioni di attrezzature stesse.

Si tenga presente che le condizioni ambientali possono condizionare i parametri del test, oltre ai tipi di sigillante utilizzato per le estremità di fissaggio dei campioni di prova.

Elenchiamo una serie di misurazioni specifiche:

- Il diametro nominale di misura è l'area della sezione trasversale come indicato con la normativa A615 / A615M e viene utilizzato per calcolare lo stress e modulo di elasticità. In entrambi i casi, la sezione trasversale nominale deve essere misurata. Se il valore nominale della sezione trasversale si differenzia dallo standard va evidenziato. Se l'area della

dimensione della barra è oltre il 20% rispetto allo standard della sezione trasversale, allora il campione non può essere utilizzato.

- Il valore nominale della sezione trasversale è calcolato come media su n°5 esemplari rappresentativi, devono essere barre uguali a quelle utilizzate per la prova di trazione. Il volume di ogni campione deve essere misurato indipendentemente dalla massa del campione stesso, e sia nello stato a secco e completamente immerso (normativa D792 per i metodi di prova).
- Il volume del campione è la massa del campione divisa per la densità misurata con la normativa D792. L'area nominale viene invece calcolata dividendo il volume per la lunghezza media del campione. criteri di prova.

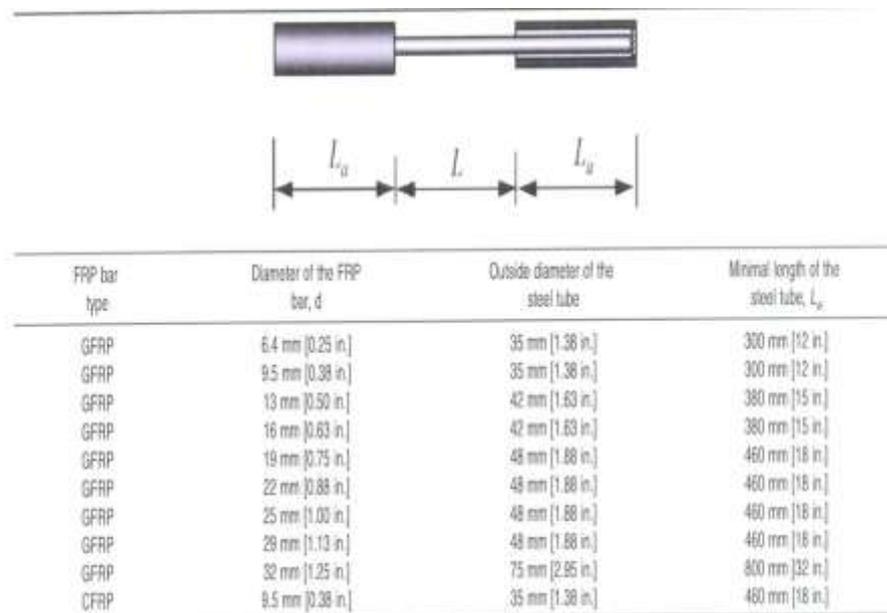


Figura II.3 – Lunghezze di ancoraggio delle barre per test di trazione



II.2.3 PRINCIPALI TIPOLOGIE DI PROVE DELL'ACI 440.3R-04 PER LA CARATTERIZZAZIONE DI BARRE E STAFFE IN FRP UTILIZZATE COME RINFORZO PER STRUTTURE IN CALCESTRUZZO

Si introducono ora le principali tipologie di test adottate dall'ACI 440.3R-04 per barre e staffe in FRP.

B.1 - Metodo di prova per la determinazione delle proprietà geometriche delle barre di FRP

Questa metodologia di prova è utilizzata per determinare l'area della sezione trasversale della barra di FRP, il suo diametro equivalente e la sua circonferenza equivalente. Per una griglia, il metodo è invece utilizzato per determinare l'area della sezione trasversale di un singolo segmento della griglia. Per quanto riguarda la preparazione dei campioni, i provini devono essere rappresentativi del lotto da testare. I campioni delle prove non devono essere sottoposti ad alcun trattamento. Durante il campionamento e la preparazione dei provini, si devono evitare deformazioni dei suddetti ed anche particolari condizionamenti ambientali, come riscaldamenti ed esposizioni esterne ai raggi ultravioletti, responsabili di cambiamenti delle proprietà del materiale. Si devono usare almeno cinque esemplari di barre, di lunghezza circa 200 mm. L'operazione di taglio del campione va effettuata con la massima cura per garantire la perpendicolarità del taglio rispetto alla direzione longitudinale del campione ed, inoltre, bisogna rimuovere eventuali bave sulla superficie del taglio. La superficie di taglio del campione può essere rivestita con un sottile strato di paraffina, qualora si consideri un problema l'assorbimento di umidità da parte del materiale fibrorinforzato. Per quanto riguarda poi il metodo di prova vero e proprio, i campioni devono essere posti nell'ambiente in cui verrà effettuata la prova per almeno 24 ore prima dell'inizio del test. Trascorso tale tempo, si



riempie un cilindro graduato con acqua o etanolo fino ad un'altezza tale che il liquido non fuoriesca dopo l'inserimento del campione nel cilindro. A questo punto si misura la lunghezza di ogni campione tre volte, ruotando i campioni di 120 gradi per ogni misurazione. Come lunghezza del provino, si assume la media delle tre misurazioni, arrotondata al più a 0,1mm. Si misura, poi, il volume di acqua o etanolo nel cilindro prima di immergere il campione. Si immerge, quindi, il campione senza alcuna parte sporgente sopra all'orlo, prestando attenzione a non intrappolare aria lungo il provino quando questo viene immerso. Si misura, infine, l'aumento di volume, dal cui valore parte la determinazione dei parametri cercati nella prova.

B.2 - Metodo di prova per la determinazione delle proprietà meccaniche delle barre di FRP

Si adotta questo metodo di prova per determinare la resistenza a trazione, il modulo di elasticità e l'allungamento a rottura delle barre di FRP utilizzate come armatura nel calcestruzzo. Per quanto riguarda la preparazione dei campioni, i provini devono essere rappresentativi del lotto da testare. Non è consentito alcun trattamento nel tratto utile del provino, mentre si possono utilizzare trattamenti nelle sezioni di ancoraggio per migliorare il legame della barra al dispositivo.

Durante il campionamento e la preparazione dei provini, si devono evitare deformazioni dei suddetti ed anche particolari condizioni ambientali, come riscaldamenti ed esposizioni esterne ai raggi ultravioletti, responsabili di cambiamenti delle proprietà del materiale. La lunghezza del campione deve essere la somma della lunghezza della sezione di prova e di quelle delle sezioni di ancoraggio, mentre la lunghezza del tratto di prova non deve essere inferiore a 100 mm, né a 40 volte il diametro della barra.



Il numero di campioni da testare non deve essere inferiore a cinque. Nel caso in cui un campione si rompa prematuramente o scivoli fuori dalla sezione di ancoraggio, bisogna eseguire un test ulteriore su un campione prelevato dallo stesso lotto in cui è stato preso il campione che ha dato esito negativo.

Per quanto riguarda, poi, il metodo di prova vero e proprio, quando si monta il campione per le analisi, si deve garantire che l'asse longitudinale del campione coincida con la linea che unisce i due ancoraggi montati sulla macchina di prova. Il *sistema di acquisizione dati* deve essere acceso un paio di secondi prima di iniziare il caricamento. La velocità di carico (velocità di spostamento o tasso di carico) deve essere costante nel corso di un test e deve essere tale che il campione si rompa in un tempo da 1 a 10 min. Il carico deve essere aumentato fino a quando si verifica la rottura per trazione. Bisogna registrare le misure della deformazione fino a quando il carico raggiunge almeno il 50% della resistenza a trazione.

B.3 - Metodo di prova (Pull out test) per la determinazione del legame di aderenza tra barre di FRP e calcestruzzo

Si adotta questa metodologia di prova, ossia il *pull out* (estrazione della barra), per la determinazione della resistenza del legame di aderenza delle barre di FRP, anche se, comunque, sono disponibili vari tipi di metodi per la determinazione del valore di tale resistenza. Per quanto riguarda la preparazione dei campioni, i provini delle barre di FRP devono essere rappresentativi del lotto da testare. Ogni campione deve essere tagliato in tratti di 1200mm e assemblato con un ancoraggio all'estremità. I campioni di prova devono contenere o una barra di FRP disposta perpendicolarmente alla direzione del getto di calcestruzzo, o due barre di FRP disposte parallelamente al getto di calcestruzzo. Il numero di



campioni da testate non deve essere inferiore a cinque. Se un campione si rompe prematuramente o scivola dalla sezione di ancoraggio o scorre dal calcestruzzo, bisogna eseguire un test ulteriore su un campione prelevato dallo stesso lotto in cui è stato preso il campione che ha dato esito negativo. Nel primo tipo di prova, ossia nel test per barre disposte perpendicolarmente alla direzione del getto, i campioni devono essere cubetti di calcestruzzo di 200 mm di lato, con una singola barra FRP incastonata verticalmente lungo l'asse centrale di ogni campione. Nel secondo tipo di prova, ossia nel test per barre disposte parallelamente alla direzione del getto, i campioni devono essere prismi di cemento di dimensioni 200 x 200 x 400mm, con gli assi più lunghi in direzione longitudinale. Devono, poi, essere inserite due barre per ogni campione, perpendicolari all'asse più lungo del prisma e parallele ed equidistanti dai suoi lati. Inoltre, in direzione longitudinale, una barra deve avere il suo asse a 100 mm dal fondo del prisma, mentre l'altra a 300mm dal fondo. Le barre devono, poi, essere collocate negli stampi come segue:

- il foro attraverso il quale passa la barra di FRP deve essere sigillato con olio, stucco o materiali simili per evitare l'ingresso di acqua e altre sostanze;
- l'orientamento del campione non deve essere modificato fino alla rimozione dello stampo. Prima del getto dei provini, occorre rivestire l'interno della superficie degli stampi. Sono inoltre consigliate le seguenti procedure per il posizionamento di calcestruzzo negli stampi (a meno che non sia utilizzato un altro metodo ben consolidato):
 - per i prismi, si deve costipare il calcestruzzo in quattro strati di uguale spessore con 25 colpi di un'asta di diametro di 16 mm;
 - per i cubi, si deve posizionare il calcestruzzo in quattro strati di uguale spessore e assestare ogni provino con 25 colpi di un'asta di diametro di 16 mm;
- avvenuto il costipamento dello strato superiore, si deve pulire la superficie.

Il calcestruzzo deve essere una miscela standard, con inerti grossi di dimensione massima di circa 20-25 mm. Gli stampi non devono essere rimossi dai campioni prima delle 20 h dopo il getto. La rimozione non deve provocare colpi o comunque disturbi alle barre. I campioni devono essere testati a 28 giorni. Quando i campioni hanno tra i 7 e 14 giorni, i prismi devono essere divisi a metà per formare due cubi di 200 mm di lato, prestando attenzione a non colpire o comunque disturbare la barra durante l'operazione. Per quanto riguarda, poi, il metodo di prova vero e proprio, una volta montato il set up di prova, si misura accuratamente, con l'approssimazione di 0,5 mm, la distanza tra la superficie superiore di aderenza della barra e il punto di attacco del dispositivo di misura sulla barra. Calcolato l'allungamento della barra e sottraendo a tale valore lo slittamento misurato, si ottiene lo slittamento al termine del carico. Alla barra si deve applicare un incremento di carico non superiore ai 20 kN/min. Le letture del carico durante la prova devono avvenire in un numero sufficiente di intervalli in modo da fornire almeno quindici letture dal momento in cui si è verificato uno scorrimento di 0,25 mm. Lo scorrimento dell'estremità libera della barra si registra per incrementi di 0,01 mm, insieme con il corrispondente carico applicato. Le letture devono avvenire ad intervalli adeguati fino alla rottura della barra, lo scorrimento del calcestruzzo confinante o lo scorrimento di almeno 2,5 mm della barra nel tratto incastonato nel calcestruzzo.

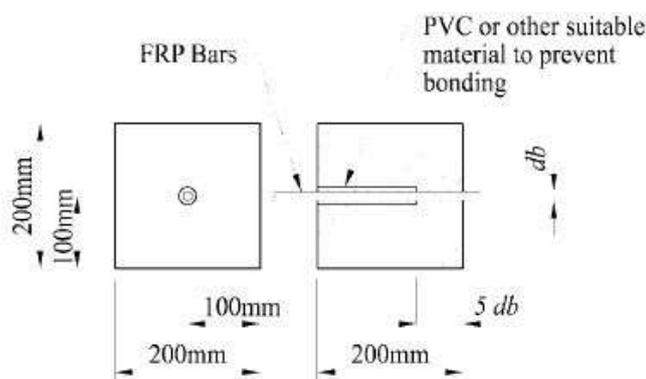


Fig II.4 - Test di aderenza per la barra disposta verticalmente

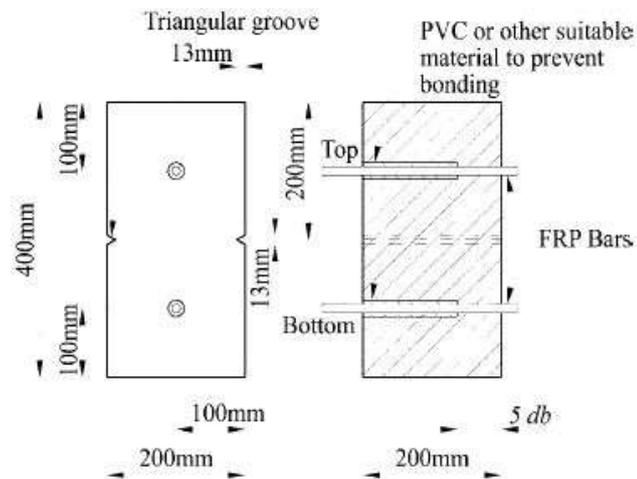


Fig II.5 - Test di aderenza per le barre disposte orizzontalmente

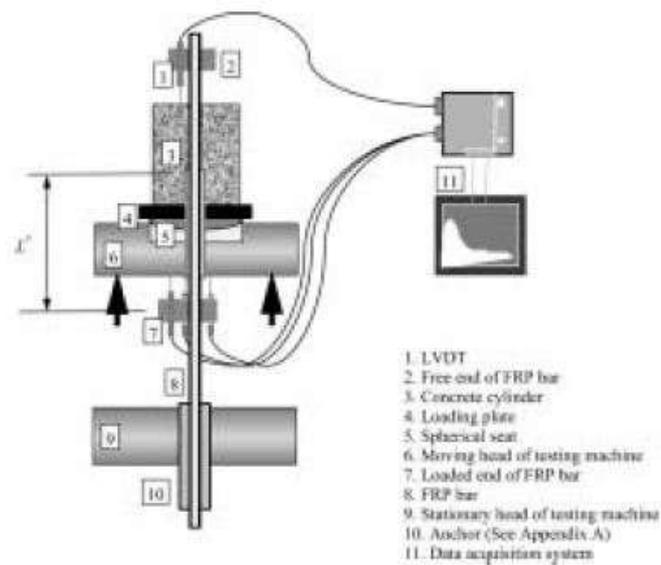


Fig II.6 - Schema dettagliato dell'apparecchio di prova

B.4 - Metodo di prova per determinare la resistenza a taglio delle barre di FRP

Questa metodologia di prova, riguardante le barre circolari di FRP, si applica per la determinazione della resistenza a taglio (effetto spinotto) attraverso l'applicazione diretta di taglio.



Per quanto riguarda la preparazione dei campioni, i provini devono essere rappresentativi del lotto da testare.

I campioni delle prove non devono subire alcun trattamento. Durante il campionamento e la preparazione dei provini, si devono evitare deformazioni dei suddetti ed anche particolari condizionamenti ambientali, come riscaldamenti ed esposizioni esterne ai raggi ultravioletti, responsabili di cambiamenti delle proprietà del materiale.

I campioni devono essere lunghi 300 mm, a prescindere dai diametri delle barre. Il numero di campioni da testate non deve essere inferiore a cinque. Per quanto riguarda, poi, il metodo di prova vero e proprio, il campione deve essere posto al centro dell'apparecchio di taglio, in modo che tocchi il dispositivo di carico superiore, ovvero non ci deve essere distanza tra la superficie di contatto del dispositivo di caricamento e il campione stesso. L'aliquota di carico specifico deve essere tale che la sollecitazione tagliente arrivi ad un valore compreso tra i 30 e i 60 MPa/min.

Il carico deve essere applicato uniformemente, senza sottoporre il campione a trattamenti che potrebbero causare shock. Il caricamento deve essere continuo fino alla rottura dello stesso. Il carico di rottura deve essere registrato con una precisione di tre cifre significative. L'incremento del carico può essere ridotto temporaneamente qualora si verifichi la presenza di due superfici di rottura.

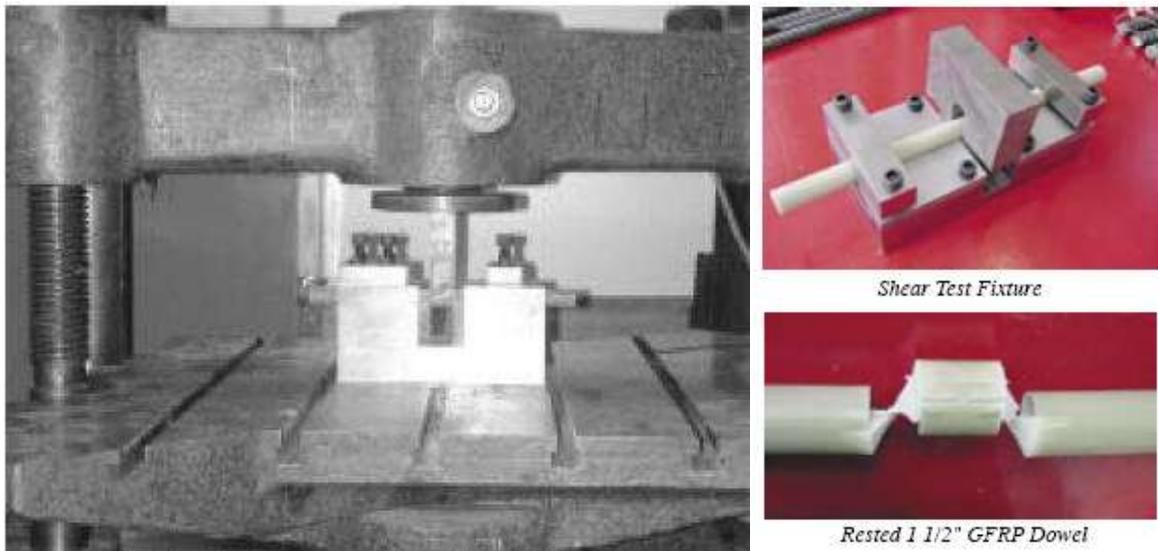


Fig. II.7 – Apparecchio di prova

B.5 - Metodo di prova per la determinazione della resistenza nella zona di piegatura in barre e staffe di FRP

Questa metodologia di prova si applica per la determinazione della capacità resistente di barre piegate di FRP utilizzate come ancoraggio per le staffe nelle strutture in calcestruzzo.

Per quanto riguarda la preparazione dei campioni, la configurazione di un esemplare tipico è riportato nella figura II.8.

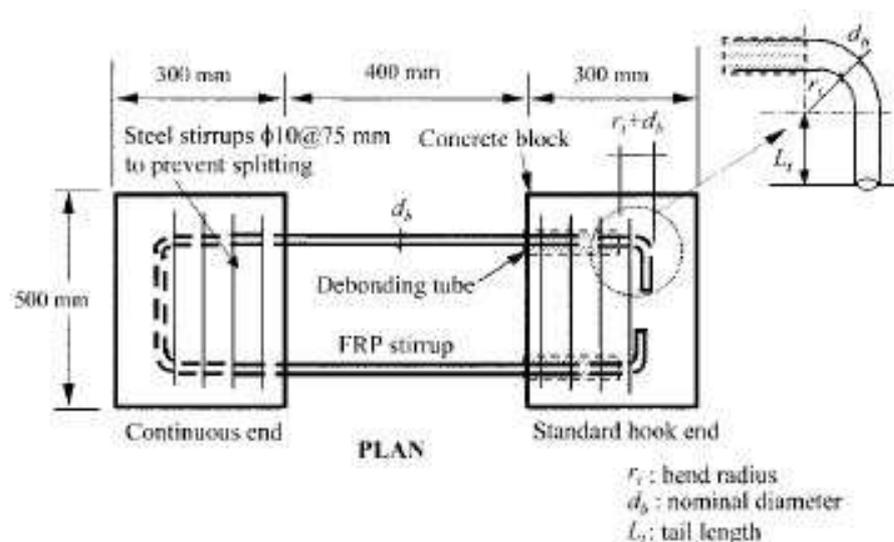


Fig. II.8 – Configurazione di un campione



Le dimensioni di ogni blocco di cemento utilizzato per l'ancoraggio della staffa di FRP possono variare in base alle dimensioni della staffa utilizzata. La lunghezza libera della staffa tra i due blocchi, tuttavia, non deve essere inferiore a 200 mm (400 mm è il valore suggerito). Il rinforzo del blocco di calcestruzzo con staffe in acciaio deve avvenire come mostrato in figura, per evitare scorrimenti delle staffe dal blocco di cemento prima della rottura delle stesse nella piegatura. Le dimensioni delle staffe possono variare e la lunghezza di ancoraggio L_T della staffa non deve superare i 150 mm. Il calcestruzzo deve essere una miscela standard, con inerti grossi di dimensione massima di 20-25 mm.

Il numero di campioni da testare non deve essere inferiore a cinque. Nel caso in cui un campione scorra fuori dal blocco di calcestruzzo, bisogna eseguire un test ulteriore su un campione prelevato dallo stesso lotto in cui è stato preso il campione che ha dato esito negativo. Se i campioni di prova falliscono a causa del *pull out* della barra piegata, ciò significa che il raggio di piegatura e la lunghezza di ancoraggio sono inadeguati per il test della barra. Sarà necessario allora modificare questi parametri e forse anche le dimensioni dei blocchi di prova per poi ripetere il test.

Per quanto riguarda il metodo di prova vero e proprio, come mostrato in Fig. II.9, c'è un martinetto idraulico, avente al suo interno una cella di carico per misurare il livello del carico stesso, che applica uno spostamento relativo tra i due blocchi di cemento.

Tali blocchi devono essere posti su rulli in acciaio per ridurre al minimo le forze di attrito tra blocchi e banco di prova. La resistenza alla trazione di barre di FRP rettilinee con gli stessi diametri delle staffe di FRP deve essere valutata in base al metodo di prova B.2.

I provini non devono essere sottoposti ad urti, vibrazioni o torsioni durante la prova. La forza applicata dal martinetto viene aumentata in modo continuo fino alla rottura del campione. Non si deve sospendere l'applicazione del carico durante la prova. Il tasso di incremento del

carico deve essere scelto in modo che il campione si rompa in un tempo compreso tra 1 e 10 min dall'inizio della prova. Si registra il carico di rottura e la modalità di errore per il campione.

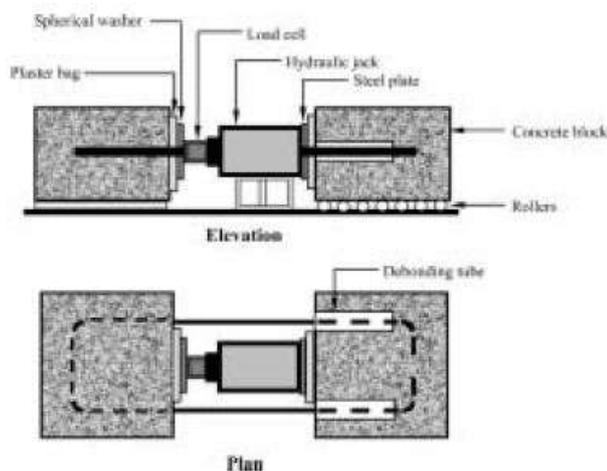


Fig. II.9 – Apparecchiatura di prova

B.6 - Metodo di prova accelerato per la resistenza alcalina delle barre di FRP

Questo metodo di prova si utilizza per determinare la resistenza all'alcalinità delle barre di FRP, utilizzate come rinforzo nel calcestruzzo, mediante l'immersione di queste in una soluzione alcalina acquosa, in presenza o assenza di carico, poi testate sotto tensione secondo il metodo di prova B.2.

Questo metodo presenta tre modalità di test diverse, condotte ad una temperatura di 60°C, ognuna delle quali definisce diverse condizioni di carico.

Procedura A - In tale sistema i campioni di FRP sono immersi in una soluzione alcalina con nessuna forza di trazione applicata.

Procedura B - In tale sistema i campioni di FRP sono immersi in una soluzione alcalina sotto carico costante di trazione.

Procedura C - In tale sistema i campioni di FRP, circondati da calcestruzzo bagnato, sono sottoposti ad un carico costante di trazione.

I campioni di barre di FRP devono essere rappresentativi di un generico lotto in esame. Durante il campionamento e la preparazione dei provini, le deformazioni, il riscaldamento, l'esposizione esterna ai raggi ultravioletti e altre condizioni ambientali devono essere evitate. In generale, questi non devono essere sottoposti ad alcun trattamento al di là della fabbricazione. Il numero di provini non deve essere inferiore a cinque.

Il valore del pH della soluzione alcalina deve essere misurato prima e dopo il test. Durante l'immersione dei campioni, il pH della soluzione alcalina deve essere monitorato almeno ogni 5 giorni e, ove necessario, bisogna mantenere gli stessi componenti e lo stesso valore del pH presenti all'inizio della prova. Anche l'aspetto esterno del campione deve essere esaminato prima e dopo la prova di alcalinità per il confronto del colore, dello stato della superficie e del cambiamento di forma.

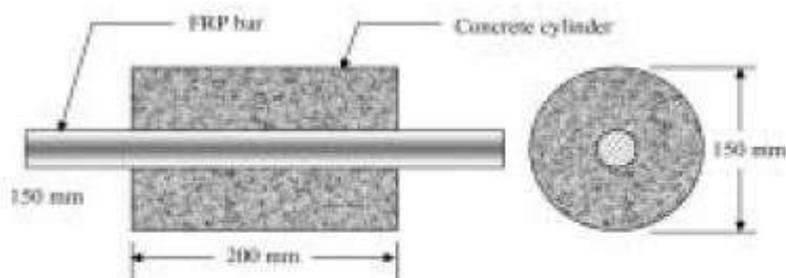


Fig. II.10 – Dimensioni del cilindro di calcestruzzo

B.7 - Metodo di prova per la tensione a fatica delle barre di FRP

Questo metodo di prova si adotta per determinare la tensione di fatica ciclica, sotto un carico costante, per le barre di FRP utilizzate come armatura nel calcestruzzo. I campioni devono essere lineari o in griglia, formati da fibre continue in modo da agire meccanicamente come un corpo monolitico. Sono possibili vari tipi di test di fatica, come tensione-tensione,



tensione-compressione, compressione-compressione e varie combinazioni di tensione, compressione e taglio. La modalità di prova tensione-tensione è considerata fondamentale per la valutazione delle caratteristiche del materiale. Il parametro di controllo della prova è il carico, e la macchina di carico è controllata in modo che il campione sia sottoposto a ripetuti carichi costanti. I campioni di barre di FRP devono essere rappresentativi di un generico lotto in esame. Durante il campionamento e la preparazione dei provini, le deformazioni, il riscaldamento, l'esposizione esterna ai raggi ultravioletti e altri condizionamenti ambientali devono essere evitate; il campione deve essere preparato e gestito conformemente al metodo B.2 ed, inoltre, la lunghezza totale deve essere più di 40 volte il diametro delle barre. Il diametro della barra si trova facendo riferimento al metodo di prova B.1

Ci deve essere un minimo di cinque campioni per ogni livello di carico, e devono essere usati almeno cinque livelli di carico per costruire un diagramma di carico rispetto ai cicli di tensione di rottura. Se un campione fallisce prematuramente, a causa dello scorrimento della barra dal blocco di calcestruzzo, è necessario eseguire un ulteriore test con un campione appartenente allo stesso lotto di quello non attendibile. Ai fini della determinazione di una curva *S-N* (dove *S* è la tensione ed *N* il numero di cicli di fatica), il minimo e il massimo carico possono riferirsi ad uno dei tre seguenti metodi:

1. Fissare il carico medio e variare l'ampiezza di carico;
2. Fissare il carico minimo e variare il carico massimo;
3. Fissare il rapporto tra il carico massimo e quello minimo e variare i valori di minimo e di massimo del carico, lasciando questo rapporto fisso.

Il metodo adottato deve essere determinato secondo lo scopo del test. In ogni caso, deve essere scelto un minimo di cinque livelli di carico in modo che il numero di cicli che provocano la rottura sia compreso in un intervallo tra 10^3 e 2×10^6 . Se il campione non attinge



la crisi dopo 4×10^6 cicli, la prova può essere interrotta: questo campione non può essere utilizzato successivamente. La frequenza di carico deve essere compresa tra 1 e 10 hertz, preferibilmente 4 Hz. Le prove per ogni campione devono essere normalmente condotte senza interruzioni durante lo svolgimento della prova. Quando la prova viene interrotta, il numero di cicli fino al momento dell'interruzione e il periodo dell'interruzione devono essere registrati.

B.8 - Metodo di prova per la rottura per creep delle barre di FRP

Questo metodo di prova si adotta per la determinazione del comportamento delle barre di FRP, utilizzate come armatura nel calcestruzzo, nei confronti del fenomeno del creep. I campioni devono essere rappresentativi di un generico lotto in esame.

Durante il campionamento e la preparazione dei provini, le deformazioni, il riscaldamento, l'esposizione esterna ai raggi ultravioletti e altre condizioni ambientali devono essere evitate. I campioni, inoltre, non devono essere sottoposti ad effetti dinamici, vibrazioni o torsioni. Il numero di provini per ogni valore di carico non deve essere inferiore a cinque; se un campione attinge la crisi prematuramente a causa dello scorrimento della barra dal blocco di calcestruzzo, è necessario eseguire un ulteriore test con un campione appartenente allo stesso lotto di quello non attendibile.

I test devono essere condotti per almeno cinque valori di carico. Il carico deve essere scelto tra lo 0,2 e lo 0,8 della resistenza di trazione misurata in base al Metodo B.2. I dati attinti dai campioni che si rompono prima dell'attingimento del carico ultimo, devono essere ignorati. Le deformazioni da creep devono essere registrate automaticamente da un registratore collegato alla macchina di prova.



B.12 – Metodo di prova per determinare l'effetto del raggio angolare sulla resistenza a trazione di staffe in FRP

Questo metodo permette di determinare l'effetto della curvatura delle parti piegate, sulle proprietà di trazione di staffe rinforzate con qualsiasi tipo di fibra o resina (FRP). I dati forniti da questo test possono essere utilizzati per la ricerca, lo sviluppo e l'accettazione o rigetto di criteri di progettazione.

ATTREZZATURA DI PROVA

Le prove di trazione vengono eseguite su barre in FRP piegate ad U, utilizzando un'unica apparecchiatura costituita da 3 componenti (Fig.II.11 e Fig.II.13):

- *Inserti angolari interscambiabili*; utilizzati per alloggiarci il campione e fatti di qualsiasi metallo idoneo, come alluminio o acciaio.
- *Parte superiore*; utilizzata come area di prova con gli inserti angolari appoggiati ai due spigoli superiori.
- *Parte inferiore*; utilizzata come traversa per tenere fermo il campione mediante ancoraggi e per fare contrasto durante la prova di trazione.

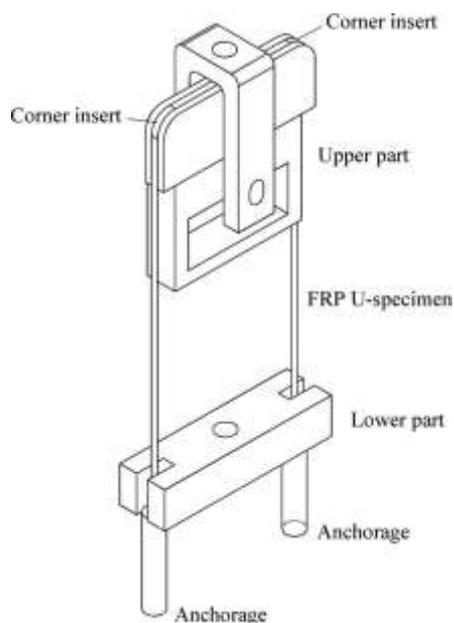


Fig. II.11 – Rappresentazione schematica del setup per la prova B.12

PREPARAZIONE DEI CAMPIONI

Il campione da testare deve essere conforme alle dimensioni e le forme del dispositivo di prova prima descritto.

Il sistema di ancoraggio, alle estremità inferiori della staffa di prova, deve essere realizzato con lunghezza e dimensioni sufficienti in modo tale che la rottura si verifichi in corrispondenza delle parti piegate.

Il campione deve essere installato con la sua linea centrale parallela a quella della superficie laterale dell'apparecchiatura di prova e deve essere strumentato con degli estensimetri da applicare lì dove si vogliono valutare i valori carico-deformazione. In particolare, un estensimetro deve essere collocato al centro del campione lungo l'estensione e nella direzione parallela a quella delle fibre. Altri estensimetri devono essere montati su entrambe le superfici piane, dentro e fuori, della zona d'angolo. Una disposizione raccomandata è mostrata in Figura II.12.

Infine è raccomandato un minimo di 5 campioni per ciascun materiale.

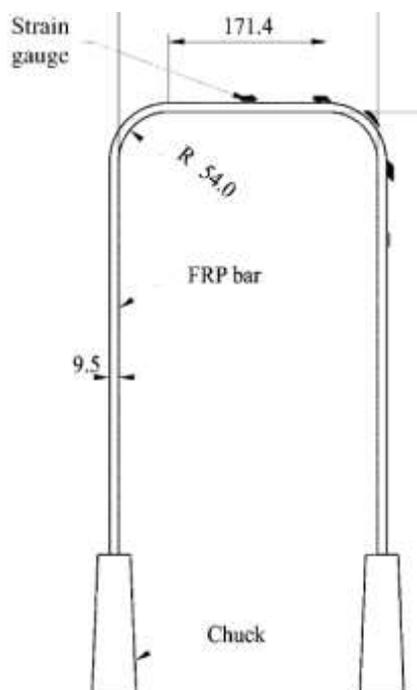


Fig. II.12 – Disposizione degli estensimetri (strain gauge)

CONDIZIONI

La prova deve essere effettuata in condizioni standard di laboratorio di 23 ± 3 ° C e $50 \pm 10\%$ di umidità relativa, a meno che non vengano specificate condizioni diverse (ad esempio temperatura o soluzione alcalina) come parte dell'esperimento.

SVOLGIMENTO

1. Assemblare l'apparecchiatura di prova;
2. Alloggiare il campione da testare nella scanalatura che corre lungo i tre componenti del dispositivo di prova;
3. Collegare gli apparecchi di registrazione dati;



4. Applicare un piccolo carico sul provino (meno del 5% del carico di rottura previsto) per allineare l'apparecchiatura di prova e poi azzerare gli estensimetri;
5. Applicare il carico di trazione (allontanando la parte superiore da quella inferiore) a velocità controllata fino al raggiungimento della rottura della staffa campione; la velocità di prova deve essere determinata in base alle specifiche del materiale da testare o del cliente. Tuttavia, se la velocità di prova non è specificata, deve essere adottata una velocità da 1,0 a 2,0 mm / min;
6. Registrare i valori tensione-deformazione;
7. Annotare il carico di rottura e la modalità della stessa (la zona di rottura normalmente si trova in prossimità della zona d'angolo).

Dunque si può calcolare (1) la “Resistenza ridotta a trazione” e (2) il “Modulo elastico”.

$$(1) \quad S = \frac{P}{2A}$$

Dove:

S = resistenza ridotta a trazione corrispondente a una specifica zona d'angolo del campione,
in MPa;

P = carico di rottura a trazione del campione, in N;

A = area della sezione trasversale della staffa di prova, in mm²;

$$(2) \quad E_L = \frac{\Delta P}{2A\Delta\varepsilon}$$

Dove:

E_L = modulo di elasticità assiale (longitudinale) del campione, in MPa;

ΔP = incremento del carico di trazione, in N;

A = area della sezione trasversale della staffa FRP, in mm²;

$\Delta \varepsilon$ = incremento di deformazione.

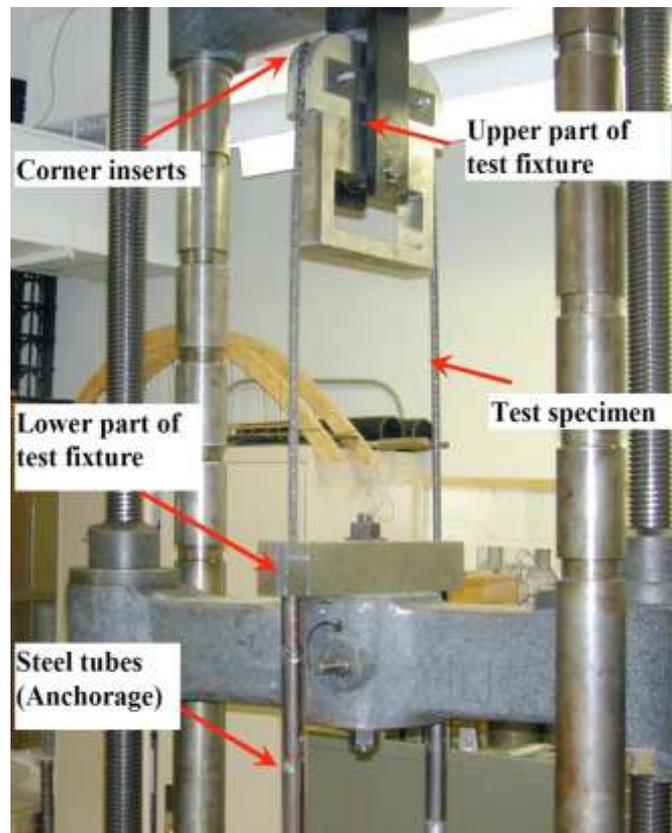


Fig. II.13 – Foto di una tipica prova B.12 su barra in FRP, piegata ad U



CAPITOLO III

CAMPAGNA SPERIMENTALE

III.1 PROVE PRESENTI IN LETTERATURA

Le prime, documentate, campagne sperimentali atte a studiare il comportamento meccanico di barre piegate/staffe di FRP risalgono ai primi anni 90 che diedero il via a studi sempre più specifici e dettagliati, soprattutto in Canada e nel Regno Unito.

Uno dei primi studi, atti a caratterizzare la resistenza a trazione di porzioni piegate di barre FRP, è denominato: *“Experimental Study on Tensile Strength of Bent Portion of FRP Rods”*.

Lo studio è stato condotto e pubblicato nel Settembre del 1993 da: Takehiko Maruyama, Masato Honma e Hajime Okamura. Gli autori hanno realizzato staffe di FRP e, dopo averle incorporate nel calcestruzzo, hanno applicato carichi per indagare sulla resistenza a trazione delle porzioni piegate. I risultati mostrano che le barre FRP si rompono in corrispondenza della piegatura e che la resistenza alla trazione diminuisce con l'aumentare del raggio di curvatura della staffa. Inoltre esse indicano che la resistenza alla trazione in curva varia con la resistenza del calcestruzzo, con il tipo di fibra utilizzata e con il metodo con cui vengono prodotte le barre.

Nel 1997 è stato pubblicato, sotto il nome di *“Bent Effect on Strength of CFRP Stirrups”*, un documento che riassume il programma sperimentale, avviato da R. Morphy, E. Shehata e S. Rizkalla, presso il dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Manitoba (*Manitoba, Canada*), atto ad esaminare le prestazioni delle staffe CFRP per il rinforzo di strutture in cemento armato. Sono stati testati un totale di 16 campioni con diverse tipologie di staffe CFRP, insieme a quattro campioni di controllo utilizzando staffe di acciaio, al fine di studiare

il loro comportamento e la modalità di rottura. Entrambe le estremità della staffa furono gettate in blocchi di cemento che sono stati, successivamente, allontanati reciprocamente per simulare le condizioni di carico su travi in cemento armato. Inoltre sono state testate un totale di tre travi di medie dimensioni rinforzate a taglio con staffe in CFRP, insieme a due travi di controllo. Le variabili considerate sono state: il tipo di materiale, diametro della barra, tipo di ancoraggio della staffa e la lunghezza d'ancoraggio della stessa nel calcestruzzo. I risultati dei test indicano che la capacità di resistenza a trazione delle staffe può essere più bassa del 40 % del carico di rottura del materiale in direzione parallela alle fibre. Sulla base delle prove fatte, si raccomanda di limitare la resistenza delle staffe CFRP al 50 per cento della resistenza in direzione parallela alle fibre.

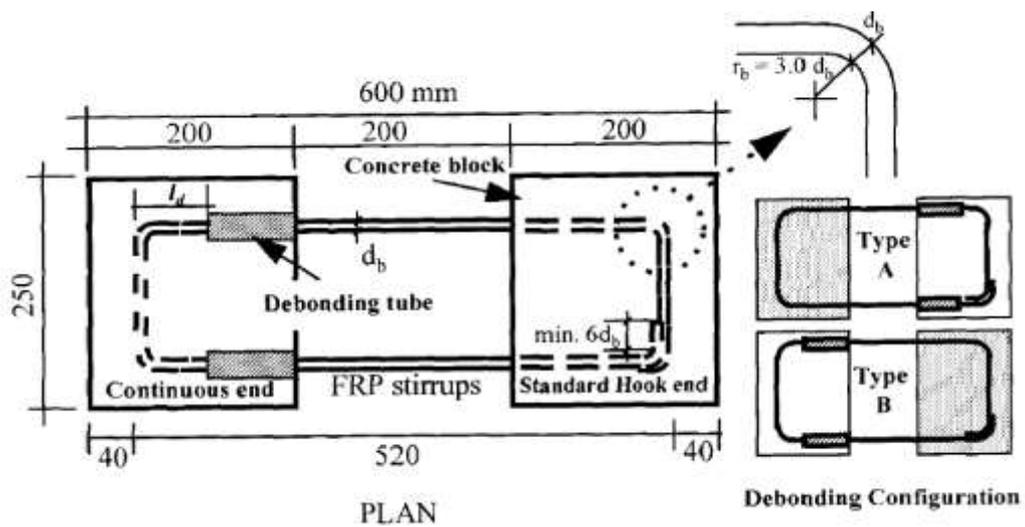


Fig. III.1 – Dettagli dei campioni testati nel documento

“Bent Effect on Strength of CFRP Stirrups” (1997)



Material Type	Nominal diameter d_b (mm)	Effective diameter $d_e = \sqrt{\frac{4A_b}{\pi}}$ (mm)	Embedment length l_d (mm)	Stirrup anchorage type	Failure stress f_u (MPa)	f_u/f_{tg}	Mode of failure *
CFRP CFCC	5 mm (7-wire)	3.59	150	A	2145	1.20	M
			80		1975	1.11	M
			r_b+d_b		916	0.51	B
			150**	B	2145	1.20	M
			80		2156	1.21	M
			r_b+d_b		1455	0.82	B
	5 mm (single wire)	4.40	150	A	1957	1.06	M
			80		1973	1.07	M
			r_b+d_b		983	0.53	B
			150**	B	1957	1.06	M
			80		1949	1.06	M
			r_b+d_b		1187	0.64	B
7.5 mm (7-wire)	6.22	150	A	1900	1.01	B	
		80		1421	0.76	B	
		r_b+d_b		798	0.43	B	
CFRP Leadline	Rect. section (5x10 mm)	7.0	150	B	1242	0.69	B
			100		1335	0.74	E
			r_b+d_b		715	0.40	B
Steel	6.35	6.35	150	A	770	1.28	M
			80		757	1.26	M
			r_b+d_b		593	0.99	B
			150**	B	770	1.28	M
			r_b+d_b		669	1.12	B

* Mode of failure : **M** between the concrete blocks; **B** at bend; **E** rupture at end of debonding inside the block

** reported for both type A and type B specimen configurations

Tab. III.1 – Risultati dei test

Nel 2007 è stato pubblicato il lavoro “*Mechanical Performance of Curved FRP Rebars - Part I: Experimental Study*” che sintetizza il programma sperimentale realizzato da T. Imjai, M. Guadagnini e K. Pilakoutas presso il dipartimento di Ingegneria Civile e Strutturale dell'Università di Sheffield (*Sheffield, SI 3JD, UK*). Questo programma sperimentale aveva lo

scopo di esaminare le prestazioni meccaniche dei materiali compositi (FRP) curvi utilizzati come materiali di rinforzo strutturale. Sono state condotte prove dirette su staffe di compositi termoplastici incorporate in blocchi di cemento ed in particolare sono state testate un totale di 47 campioni e 19 configurazioni diverse. I parametri che sono stati studiati includono: geometria della piegatura, trattamento della superficie, lunghezza di ancoraggio e resistenza del calcestruzzo. I risultati estraibili dalle prove indicano che la capacità a trazione del composito curvo in FRP può essere più bassa del 25% della resistenza ultima a trazione nella direzione parallela a quella delle fibre. Inoltre, sulla base dei risultati dei test, si evince che il raggio di curvatura deve essere pari a 4 volte il diametro della barra affinché sia garantita una resistenza del composito del 40% della resistenza in direzione parallela a quella delle fibre.

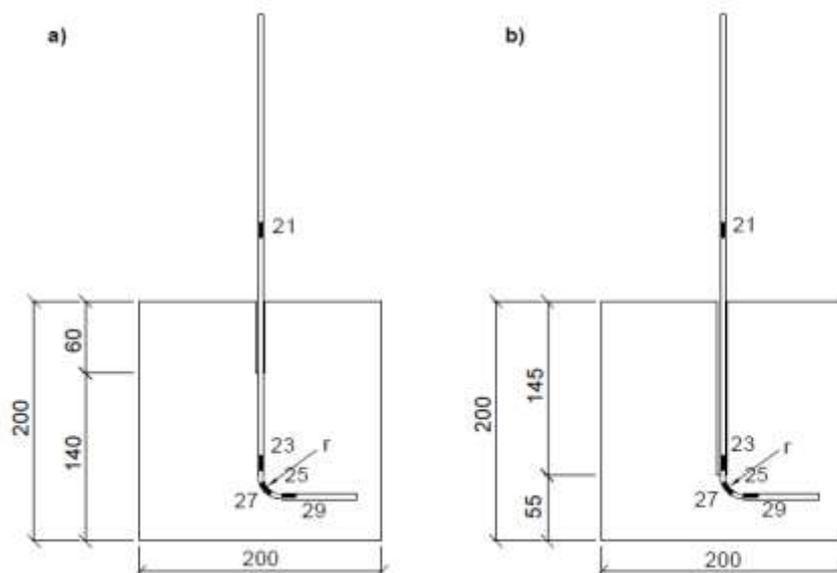


Fig. III.2 – Due diverse disposizioni degli estensimetri

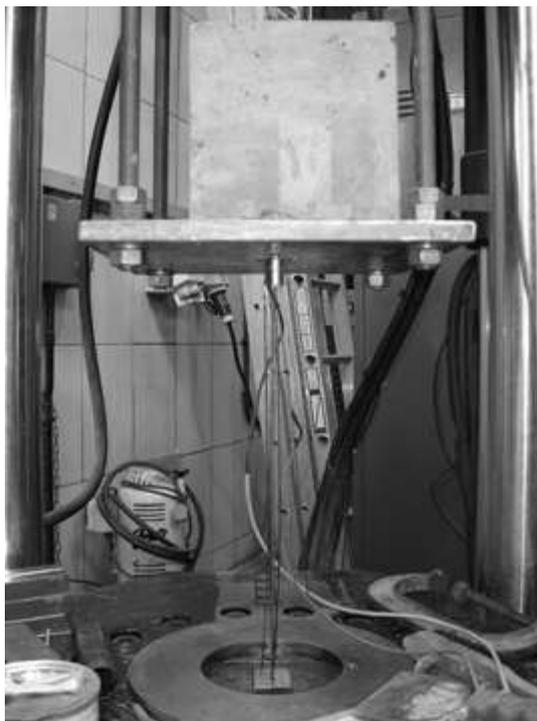


Fig. III.3 – Set-up di prova

Ancora nel 2007 è stato pubblicato il Documento Scientifico “*Mechanical and Structural Characterization of New Carbon FRP Stirrups for Concrete Members*”, realizzato dagli studiosi Ahmed K. El-Sayedl, Ehab El-Salakawy e Brahim Benmokrane.

Questo articolo descrive un programma sperimentale condotto per lo studio di staffe fibrorinforzate in carbonio (CFRP) utilizzate come armatura a taglio in elementi strutturali in calcestruzzo. Per simulare le prestazioni delle staffe in travi di cemento, la staffa in CFRP è stata inserita in due blocchi di cemento e messa in tensione con l’allontanamento reciproco dei due blocchi di cemento. Sono stati prodotti e testati a rottura un totale di dodici campioni. Le variabili di prova erano la lunghezza della staffa al di là della zona piegata, l’ancoraggio della staffa, il diametro della barra e la lunghezza di ancoraggio. Inoltre, sono stati realizzati e testati a rottura due travi su vasta scala, rinforzate a taglio con staffe in fibra di carbonio. I



risultati dei test hanno mostrato che la capacità di resistenza, in corrispondenza della curvatura delle staffe in CFRP, è stata idonea e soddisfa i requisiti di progettazione dei diversi codici e guide di progettazione. Le prestazioni delle staffe nelle travi erano idonee fino alla rottura per flessione delle travi.

Per conseguire gli obiettivi di questa ricerca, è stata realizzata una campagna sperimentale svoltasi in due fasi. La prima fase, *Fase I*, si è occupata della caratterizzazione meccanica di staffe in CFRP. Come già detto, la piegatura delle barre di FRP, durante la produzione delle staffe, causa la riduzione della resistenza a trazione. L'obiettivo principale è stato quello di sviluppare staffe in CFRP con resistenza a trazione almeno pari alla resistenza allo snervamento delle convenzionali staffe in acciaio (400-500 MPa) utilizzate in elementi strutturali di calcestruzzo come le travi da ponte. In questa fase, sono stati prodotti cinque gruppi di staffe in CFRP a forma di U, diversi per processo produttivo e contenuto in volume di fibre di carbonio. Le staffe a U in CFRP sono state testate secondo il metodo di prova B.12 della guida ACI 440.3R-04 per determinare la resistenza alla trazione delle staffe CFRP in corrispondenza della curvatura. L'obiettivo di questo metodo è stato individuare il tipo di staffe in CFRP, con resistenza di trazione più elevata, per poi avviare la fase II di questo programma sperimentale.

Nella seconda fase, *Fase II*, si è valutato il comportamento strutturale di una sola staffa FRP incorporata in blocchi di cemento in base al metodo di prova B.5 della guida ACI 440.3R-04. Entrambe le estremità della staffa sono state gettate in blocchi di cemento che sono stati, successivamente, reciprocamente allontanati per simulare le condizioni di carico di travi in cemento. Questa fase è stata dedicata allo studio dell'effetto di diversi parametri sulle caratteristiche e la capacità della barra piegata incorporata nel calcestruzzo.

FASE I

Dal produttore sono stati forniti, come mostrato in Figura III.4, cinque gruppi (A, B, C, D e E) di staffe in FRP, aventi forma a U, da testare con il metodo B.12 dell'ACI 440.3R-04. Le principali differenze tra i cinque gruppi erano:

- il contenuto di fibre di carbonio (che variava dal 55% per il prodotto A al 75% per il prodotto E);
- il metodo di allineamento delle fibre;
- il processo di postindurimento.

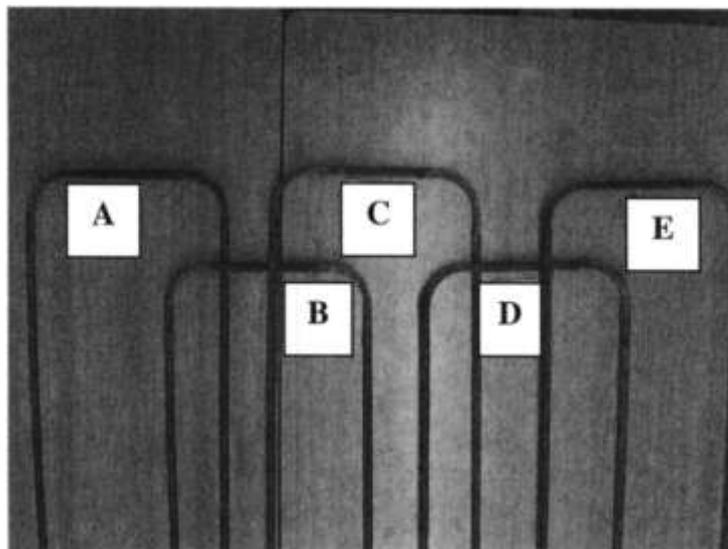


Fig. III.4 – Gruppi di staffe FRP testati nella Fase I

Inoltre tutti i provini dei cinque gruppi erano barre CFRP piegate a forma di U di diametro $d_b = 12,7$ mm, con una lunghezza di 1.200 mm, larghezza 290 mm e con raggio di curvatura interno di 75 mm (6 volte il diametro della barra). Dunque cinque provini per ciascun gruppo sono stati testati per determinare le loro resistenza di piegatura secondo il metodo di prova B.12 dell'ACI440.3R-04. Inoltre, sono state eseguite prove di trazione su quattro tratti rettilinei delle staffe CFRP per determinare la loro resistenza a trazione longitudinale secondo il metodo di prova B.2 ACI 440.3R-04. Su alcuni campioni sono stati applicati degli

estensimetri elettrici per misurare la deformazione, durante la trazione, nelle parti piegate e rettilinee come mostrato in Figura III.5. Invece il setup di prova e il campione durante il test sono mostrati in Figura III.6.

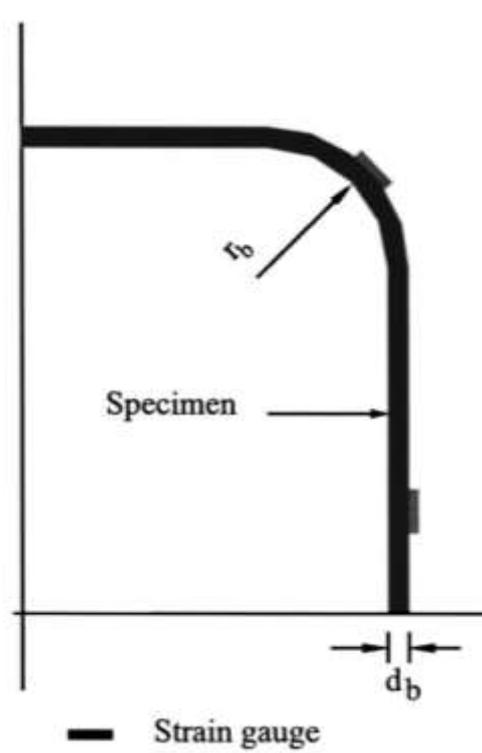


Fig. III.5 – Disposizione degli estensimetri

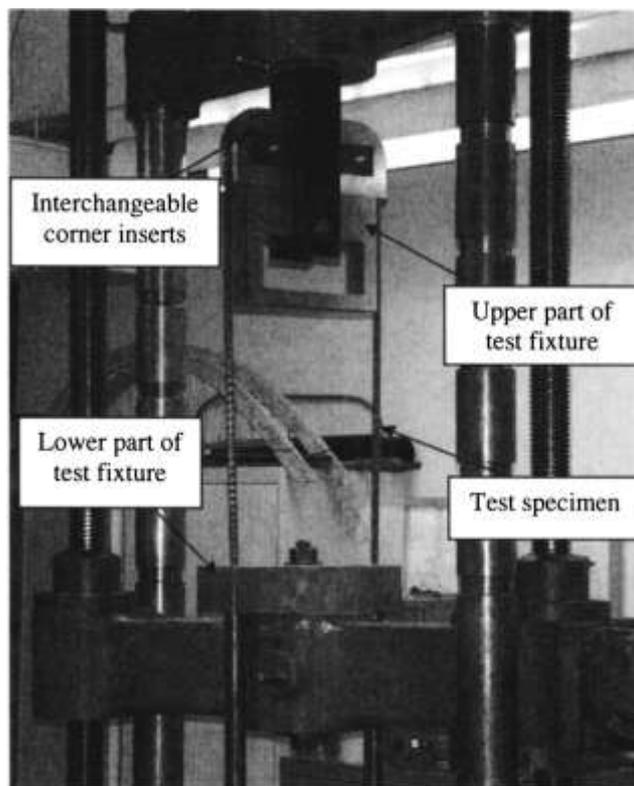


Fig. III.6 – Setup di prova (Fase I)

Tutti i campioni di staffe in CFRP, nella Fase I, sono stati testati fino a rottura; la modalità di rottura era localizzata nelle zone di piegatura, come mostrato in Figura III.7.

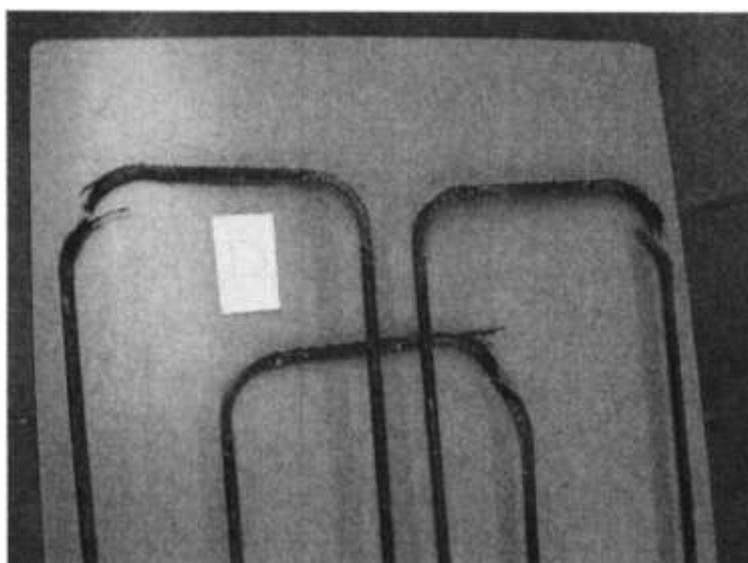


Fig. III.7 - Tipiche rotture di staffe in CFRP



Il Prodotto E (quello con la maggior percentuale di fibre) ha fornito la capacità più alta e di conseguenza è stato scelto per i test della Fase II. In particolare:

- la resistenza a trazione in corrispondenza della piegatura (f_{fb}) dei campioni testati di questo prodotto variava tra 408 e 534 MPa con una resistenza media di 460 MPa, che è paragonabile al limite di snervamento delle staffe di acciaio utilizzate convenzionalmente come rinforzo di travi in cemento.
- la resistenza a trazione delle parti rettilinee [f_{fuV} (parallele alle fibre)] variava da 1.101 a 1.237 MPa con una resistenza media di 1.185 MPa
- Il modulo di elasticità medio (E_{fv}) era di 109 GPa.

La tabella III.2 riassume i valori medi per il prodotto E:

Specimen	d_b (mm)	Average tensile strength (MPa)			Average ultimate strain ($\mu\epsilon$)		E_{fv} (GPa)	τ_{fuV} (MPa)
		f_{fb}	f_{fuV}	f_{fb}/f_{fuV} (%)	ϵ_{fb}	ϵ_{fuV}		
Product E	12.7	460	1,185	39	7,410	10,871	109	190

Tab.III.2 Risultati dei test sui campioni di staffe a U in CFRP, prodotto E

Si può osservare che la resistenza in curva f_{fb} , della staffa, era circa il 39% della resistenza della parte diritta, parallela alle fibre, f_{fuV} (ossia di una barra di pari diametro). La riduzione della resistenza in corrispondenza della zona piegata è da attribuire alla concentrazione delle sollecitazioni in quella zona e alla debolezza intrinseca delle fibre perpendicolari all'asse della staffa.

FASE II

Le staffe in CFRP di tipologia E sono state utilizzate nella *Fase II* per esaminare le loro prestazioni strutturali. Sono state costruite e testate fino a rottura, con il metodo di prova B.5 dell'ACI 440.3R-04, un totale di 12 campioni del prodotto E, con due diverse configurazioni di ancoraggio: la prima, Tipo A, consiste in una estremità con gancio standard, mentre la seconda configurazione, Tipo B, consiste in una estremità continua. I tipi di configurazione e le dimensioni di un generico campione utilizzato, sono mostrati nella Figura III.8.

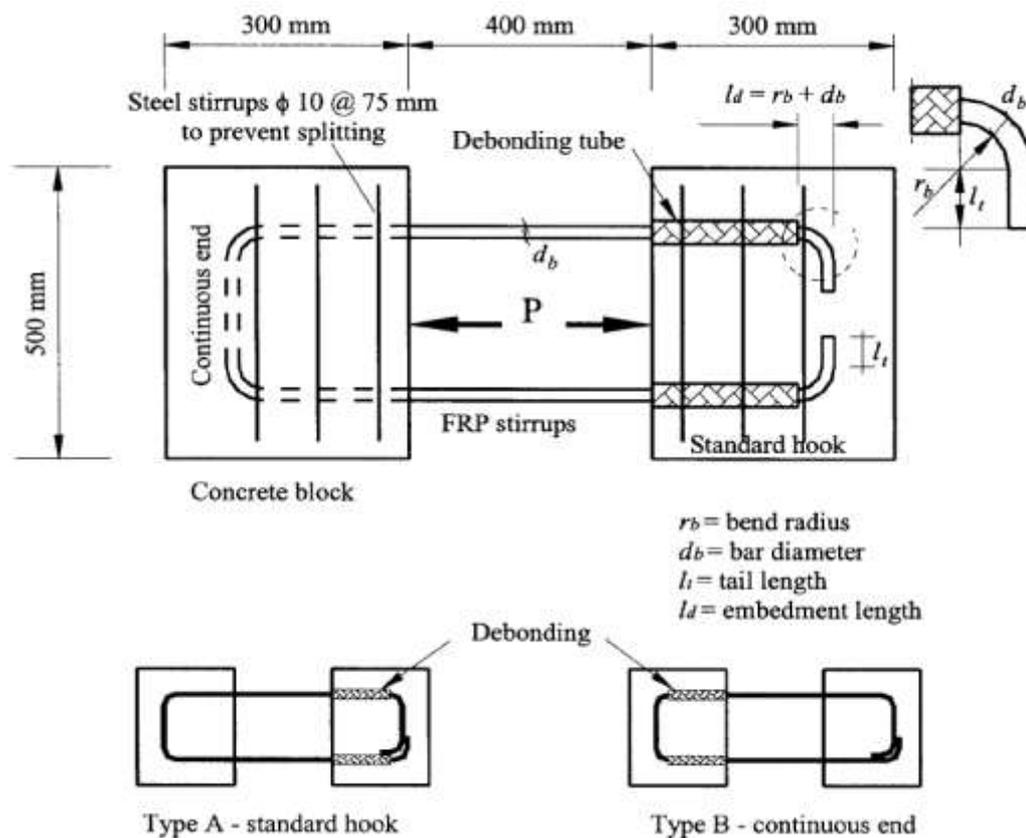


Fig. III.8 - Dettagli di staffe CFRP incorporate in blocchi di cemento (Fase II)

Le dimensioni dei blocchi di cemento erano 500x300x200 mm. La lunghezza libera della staffa tra i due blocchi è stata mantenuta costante a 400 mm. Il metodo di prova B.5 permette di determinare la capacità di resistenza della porzione piegata per una singola staffa FRP

sottoposta a forze di trazione nella direzione della porzione rettilinea. La configurazione di test consisteva in:

- un *martinetto idraulico* da 500 kN per applicare uno spostamento relativo tra i due blocchi;
- una *cella di carico* per misurare il carico applicato;
- *Piastre di acciaio* poste di fronte al martinetto idraulico per distribuire il carico applicato sulla superficie del calcestruzzo;

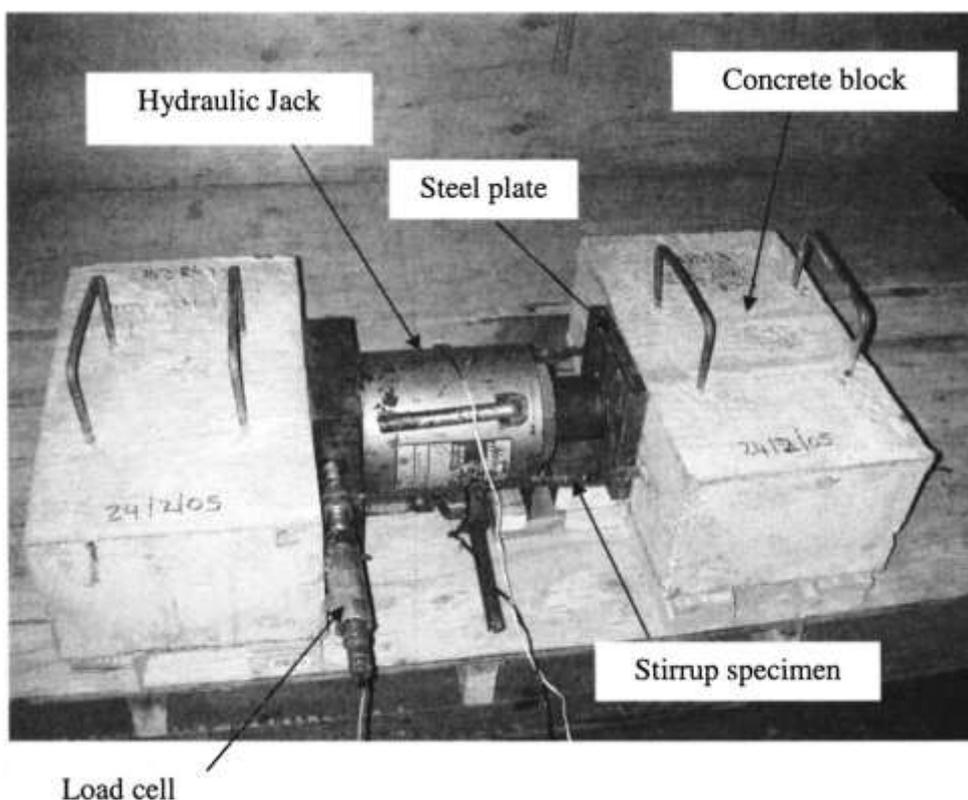


Fig III.9 - Setup di prova (Fase II)

I risultati delle prove sui 12 campioni testati con i blocchi di calcestruzzo e dunque della campagna sperimentale, sono riportati in Tabella III.3.



d_b (mm)	Bend radius		Tail length		Embedment length		Stirrup anchorage type	Stress at failure f_{fu} (MPa)	Longitudinal tensile strength, f_{fwr} (MPa)		Mode of failure ²	
	r_b (mm)	r_b/d_b	l_t (mm)	l_t/d_b	l_d (mm)	l_d/d_b			f_{fu}/f_{fwr}			
9.5	38.1	4.0	28.5	3	$r_b+d_b=47.6$	5	A	394	1,328	0.30	S-RB	
			57.0	6						0.53	R-B	
			85.5	9						0.57	R-B	
			114.0	12						0.49	R-B	
			142.5	15						0.45	R-B	
			—	—						—	—	
12.7	50.8	4.0	38.1	3	$r_b+d_b=63.5$	5	A	472	1,224	0.39	S-RB	
			38.1	3						0.37	S-RB	
			76.2	6						0.56	R-B	
			114.3	9						0.44	R-B	
			—	—			—	—	B	697	0.57	R-B
			—	—			250.0	20	B	1,236	1.01	R-S

²S-RB=slippage of bonded portion of stirrups followed by rupture at the bend; R-B=rupture of stirrups at the bend; and R-S=rupture of stirrups along straight portion between concrete blocks.

Tab. III.3 - Dettagli e risultati dei test effettuati su Staffe in CFRP vincolate in blocchi di cemento (Fase II)

Infine, il documento scientifico più recente, inerente alla nostra campagna sperimentale, è stato pubblicato sul *Journal of Composites for Construction* ©ASCE nel gennaio del 2010.

Si tratta della campagna sperimentale intitolata “*Bend Strength of FRP Stirrups: Comparison and Evaluation of Testing Methods*” e realizzata dagli studiosi Ehab A. Ahmed, Ahmed K. El-Sayed, Ehab El-Salakawy e Brahim Benmokrane. Essa fornisce una comparazione e valutazione degli attuali metodi di prova utilizzati per determinare la resistenza, in corrispondenza della zona di piegatura, di barre piegate/staffe fibrorinforzate a matrice polimerica. I metodi disponibili variano a seconda dell’applicazione delle forze di trazione lungo il tratto rettilineo della staffa e mantenendo vincolata la zona curva in modo da generare una sollecitazione perpendicolare alla direzione di piegatura oltre alla tensione nella direzione longitudinale. Ciò potrebbe essere realizzato attraverso il metodo di prova B.12 proposta dall’ACI 440.3R-04 per le staffe a forma di U. Un altro metodo descritto sempre dall’ACI 440.3R-04 è il B.5 che valuta la resistenza curva delle staffe di FRP inserendole in due blocchi di cemento, che sono spinti reciprocamente fino alla rottura delle staffe in FRP. Nel



documento sono riportate prove fatte con entrambi i metodi e sono stati confrontati i risultati ottenuti. In particolare, dai risultati dei test, si evince che il metodo di prova 440.3R-04 ACI B.12 sottostima, costantemente, la resistenza curva delle staffe di FRP. Al contrario, il metodo B.5 è più attendibile e rappresentativo dello stato effettivo delle sollecitazioni nei reali elementi strutturali in calcestruzzo.

I campioni in FRP che furono utilizzati in questo studio erano stati realizzati con fibre longitudinali continue di carbonio e vetro, pre-impregnate in una resina termoindurente vinilestere e processo di avvolgimento con un tenore di fibre che vanno dal 75 all' 80% in peso. Le barre piegate/staffe FRP avevano una superficie rivestita di sabbia per migliorare le prestazioni di aderenza tra le barre e il calcestruzzo circostante.

I campioni di prova comprendevano tre gruppi di barre piegate/staffe GFRP, No. 10, 16 e 19 (9,5, 15,9, e 19,1 mm di diametro) e un gruppo di barre piegate/staffe CFRP, No. 10 (9,5 mm di diametro mm). Ogni gruppo era costituito da sei campioni rettilinei, da testare con il metodo di prova B.2 proposto dall'ACI 404.3R-04, per ottenere la capacità a trazione e modulo di elasticità parallelo alla direzione delle fibre, cinque campioni a forma di U da testare con il metodo di prova B.12 e quattro campioni a forma di C per il metodo di prova B.5. Inoltre i campioni di ciascun gruppo sono stati presi dallo stesso lotto per valutare la differenza del valore della resistenza in corrispondenza della zona piegata tra il metodo di prova B.5 e quello B.12.

FRP type	FRP bar number	Diameter (mm)	Number of specimens		
			Straight for B.2	C-shaped for B.5	U-shaped for B.12
CFRP	10	9.5	6	4	5
GFRP	10	9.5	6	4	5
	16	15.9	6	4	5
	19	19.1	6	4	5

Tab. III.4 - Dettagli dei campioni testati

Infine i campioni testati con il metodo di prova B.5 erano di Tipo B e tutti i campioni avevano un raggio di curvatura pari a 4 volte il diametro della barra ($r_b = 4d_b$) in modo tale da soddisfare le linee guida ACI in merito al rapporto minimo tra raggio di curvatura e diametro delle staffe (3.0 per barre piegate/staffe FRP No. 6 ÷ 25 e pari a 4.0 per staffe No. 29 ÷ 32).

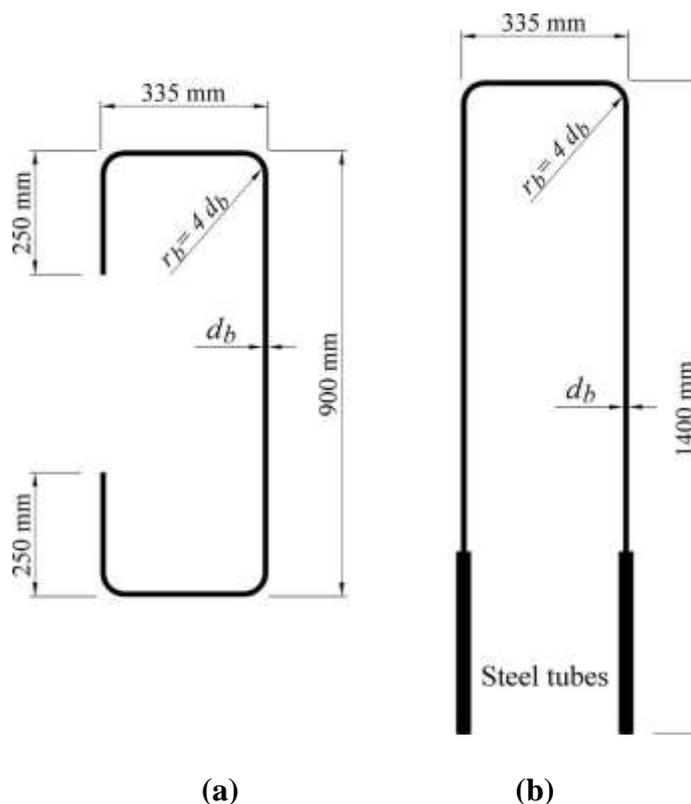


Fig. III.10 - Dettaglio dei campioni testati: (a) Dimensioni dei campioni a forma di C per il test B.5
(b) Dimensioni dei campioni a forma di U per il test

B.12

I risultati dei test hanno mostrato una certa discrepanza nella valutazione della capacità curva delle staffe in FRP secondo i metodi di prova B.5 e B.12 dell'ACI (American Concrete Institute 2004). Infatti nonostante tutti i campioni, sia quelli a forma di C per il metodo di prova B.5 che quelli a forma di U per il metodo di prova B.12, siano stati presi dallo stesso lotto e caratterizzati dallo stesso raggio di curvatura ($r_b = 4d_b$), le loro resistenze



curve, valutate con entrambi i metodi di prova B.5 e B.12, erano significativamente differenti come riportato in Tabella III.5.

	Bend strength of CFRP Number 10 (9.5 mm)		Bend strength of GFRP Number 10 (9.5 mm)		Bend strength of GFRP Number 16 (15.9 mm)		Bend strength of GFRP Number 19 (19.1 mm)	
	B.5 (MPa)	B.12 (MPa)	B.5 (MPa)	B.12 (MPa)	B.5 (MPa)	B.12 (MPa)	B.5 (MPa)	B.12 (MPa)
Average ^a	712	506	387	232	404	240	310	218
SD	46	35	15	46	35	20	21	16
COV (%)	6.5	6.9	3.9	19.8	8.7	8.3	6.8	7.3
$f_{\text{bend}}/f_{\text{fu}}^{\text{b}}$	0.46	0.33	0.58	0.35	0.68	0.40	0.58	0.41
$f_{\text{bend B.12}}/f_{\text{bend B.5}}^{\text{c}}$	0.71		0.60		0.59		0.70	

^aAverage of four specimens for B.5 method and five specimens for B.12 method.

^b f_{bend} : the bend strength of FRP stirrup (bent bar); f_{fu} : the tensile strength of FRP bars parallel to the fiber's direction.

^c $f_{\text{bend B.5}}$: the bend strength based on B.5 test method; $f_{\text{bend B.12}}$: the bend strength based on B.12 test method.

Tab. III.5 – Risultati della campagna sperimentale: resistenze in corrispondenza della piegatura

Nella stessa tabella sono riportati anche i rapporti tra la resistenza curva valutata con il metodo di prova B.12 ($f_{\text{bend B.12}}$) e quella valutata con il metodo B.5 ($f_{\text{bend B.5}}$).

Questo rapporto è compreso tra il 59 e il 70% per barre piegate in GFRP ed era del 71% per le barre piegate in CFRP. Ciò implica che testando lo stesso campione-staffa in FRP con il metodo B.12 si ottiene un resistenza curva inferiore a quella stimata dal metodo B.5, con un rapporto compreso tra il 30 e 40%.

Dunque, sulla base del programma sperimentale appena descritto, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Vengono confermati i risultati degli studi precedenti per quanto riguarda la riduzione della resistenza a trazione in corrispondenza della zona di piegatura. Infatti la resistenza a trazione della parte piegata è significativamente inferiore a quella della parte rettilinea e ciò è da attribuire alla concentrazione delle sollecitazioni in quella zona e alla debolezza intrinseca delle fibre perpendicolari all'asse della staffa.



- Considerando il confronto tra i metodi B.5 e B.12, proposti dall'ACI 440.3R-04, per determinare la resistenza in corrispondenza della piegatura, i risultati dei test hanno dimostrato che il metodo di prova B.12 sottostima la resistenza in curvatura delle staffe di FRP rispetto al metodo di prova B.5. In particolare la resistenza valutata con il metodo B.12 era tra il 30 e il 40% in meno della resistenza valutata col metodo B.5.
- Dal momento che i valori della resistenza, in corrispondenza della piegatura, ottenuti con il metodo di prova B.12 sono costantemente inferiori a quelli ottenuti con il metodo di prova B.5, per la stima della resistenza delle staffe devono essere presi in considerazione limiti diversi a seconda del metodo di prova utilizzato. Tali limiti possono essere pari al 30 o al 45% della resistenza a trazione in direzione parallela a quelle delle fibre, a seconda che si utilizza, rispettivamente, il metodo B.12 o il metodo B.5.
- Secondo l'opinione degli autori, il metodo di prova B.5 (blocchi di calcestruzzo) è più corretto, rispetto al metodo di prova B.12, per valutare la capacità delle staffe di FRP in quanto simula il reale meccanismo di sollecitazione delle staffe in travi di cemento. Tuttavia, il metodo B.12, può essere utilizzato per una valutazione preliminare della capacità delle staffe di FRP.

III.2 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI STAFFE IN GFRP

In questo paragrafo viene descritta l'attività sperimentale, ad oggi in itinere, che si sta effettuando, per la prima volta in Italia, presso il dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, al fine di caratterizzare meccanicamente staffe in GFRP.

Essa prevede test su 20 staffe chiuse in GFRP, di diametro (d_b) uguale a 8 mm e di raggio di curvatura (r_b) pari a 7.5 mm.



Fig. III.11 – Staffa campione utilizzata per i test

I test sono eseguiti con il metodo di prova B.12 proposto dall'ACI 440.3R-04. Questo metodo consente di determinare le proprietà meccaniche offerte dalle zone di piegatura e quindi l'influenza delle stesse sulla resistenza a trazione dell'intera staffa.

Tuttavia, essendo test effettuati per la prima volta, si è rivelato necessario progettare e realizzare, grazie alla collaborazione dell'azienda ATP srl, l'attrezzatura descritta dalle linee guida americane.

Inoltre, a causa della diversa tipologia dei campioni da testare rispetto a quelli indicati dalle stesse linee guida (staffe chiuse anziché aperte ad U), è stato opportuno apportare delle modifiche alla strutturazione dell'attrezzatura descritta e modellare ciascun componente in funzione delle caratteristiche geometriche dei campioni stessi. Dunque sono stati utilizzati programmi di modellazione, sia 2D che 3D, al fine di rendere il più esaustive e dettagliate possibili, le fasi di produzione e assemblaggio del set-up.

In particolare l'attrezzatura ideata è realizzata completamente in acciaio e consta di:

- Un totale di 4 *inserti angolari* uguali a due a due, realizzati con un'apposita scanalatura esterna per alloggiarvi la staffa e una cavità interna in modo da “chiuderli a portafoglio” intorno a un altro componente (la parte centrale). Nelle figure seguenti si riportano i dettagli costruttivi e geometrici, diverse viste della modellazione tridimensionale e foto finali dei quattro inserti angolari realizzati.

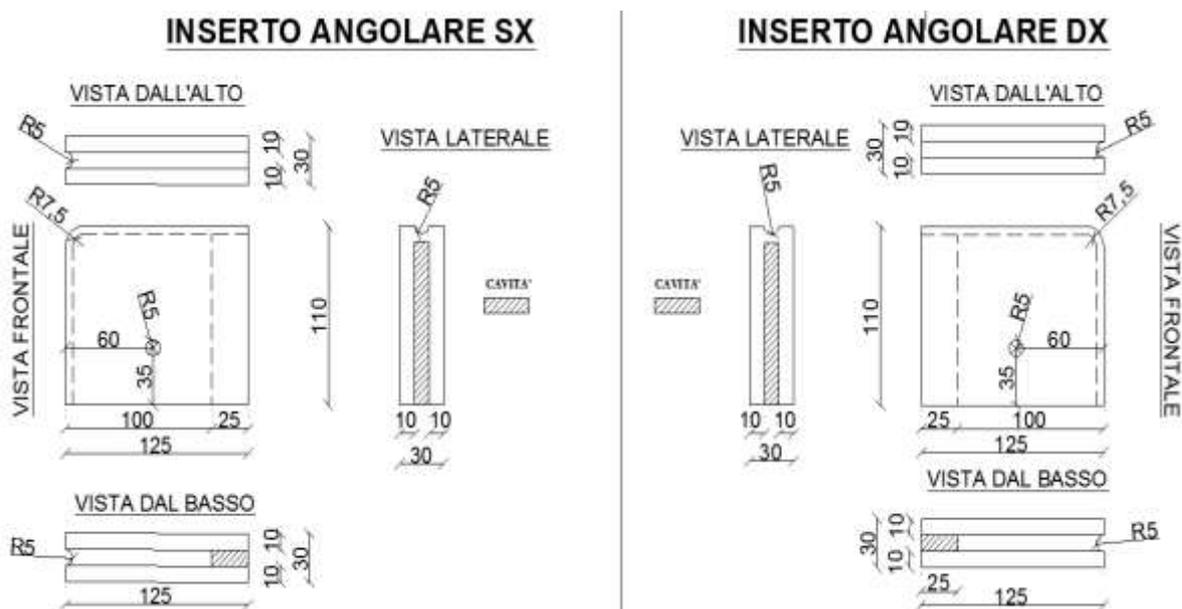


Fig. III.12 – Dettagli costruttivi di una coppia di inserti angolari

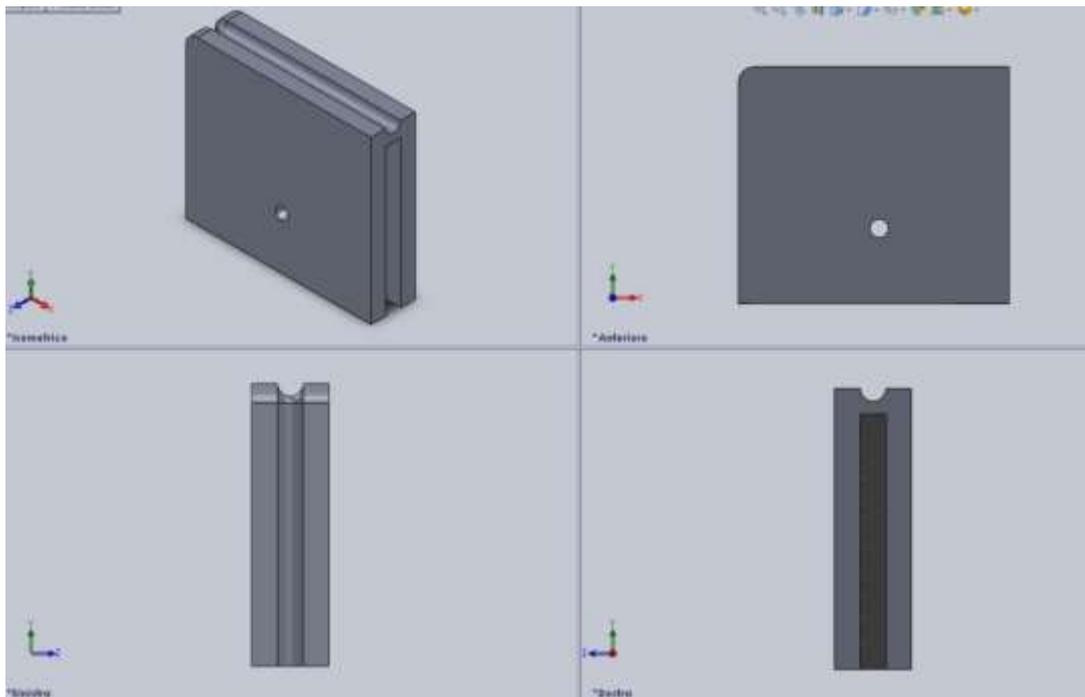


Fig. III.13 – Viste tridimensionali del particolare inserto angolare



Fig. III.14 – Foto degli inserti angolari prodotti

- 2 Parti centrali, utilizzate come area di prova e per la collocazione degli inserti angolari.

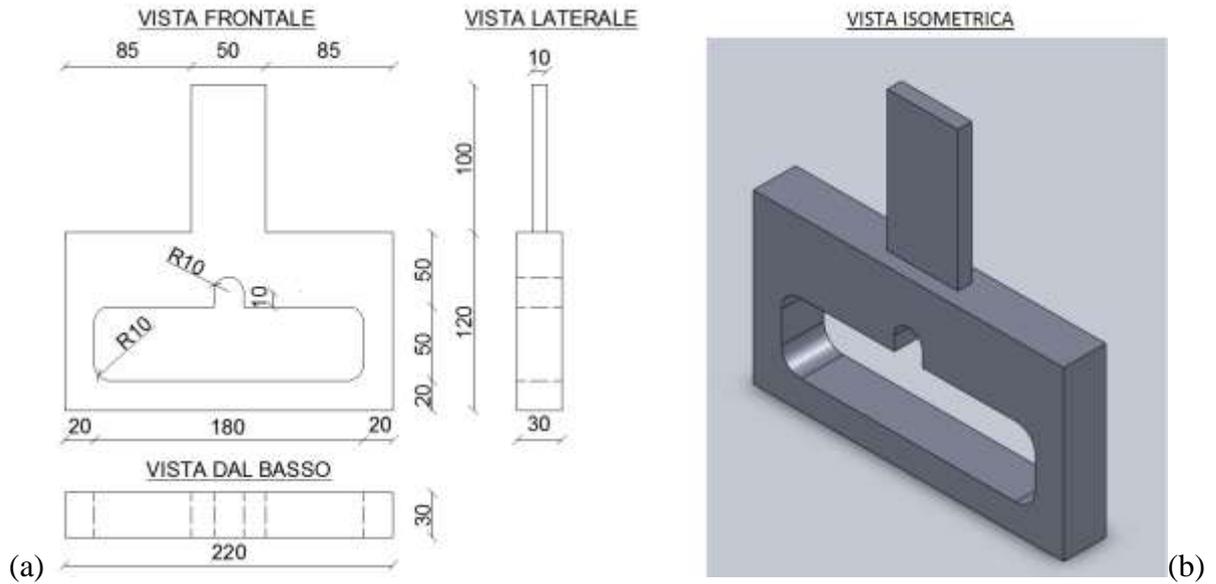


Fig. III.15 – Parte centrale: (a) dettagli costruttivi
(b) vista tridimensionale



Fig. III.16 – Foto delle parti centrali prodotte

- 2 forcelle, al fine di rendere possibile l'applicazione della forza di trazione.

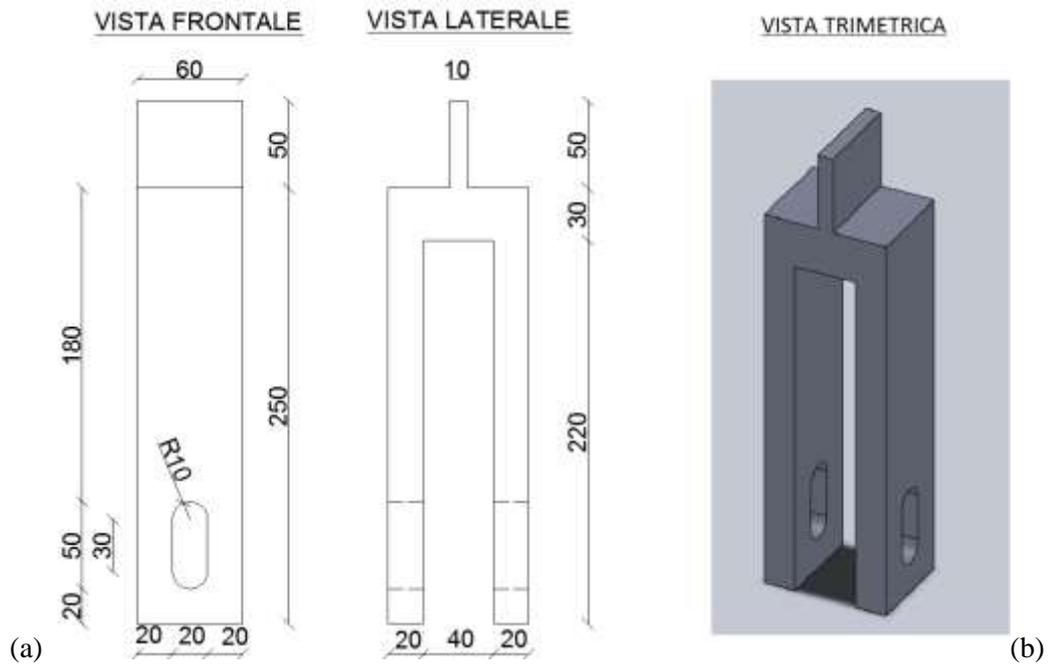


Fig. III.17 – Forcella: (a) dettagli costruttivi
(b) vista tridimensionale



Fig. III.18 – Foto delle forcelle prodotte

- Un totale di 4 cravatte, al fine di rendere solidali tra loro gli inserti angolari e quindi garantire una maggiore stabilità dell'intera strumentazione.

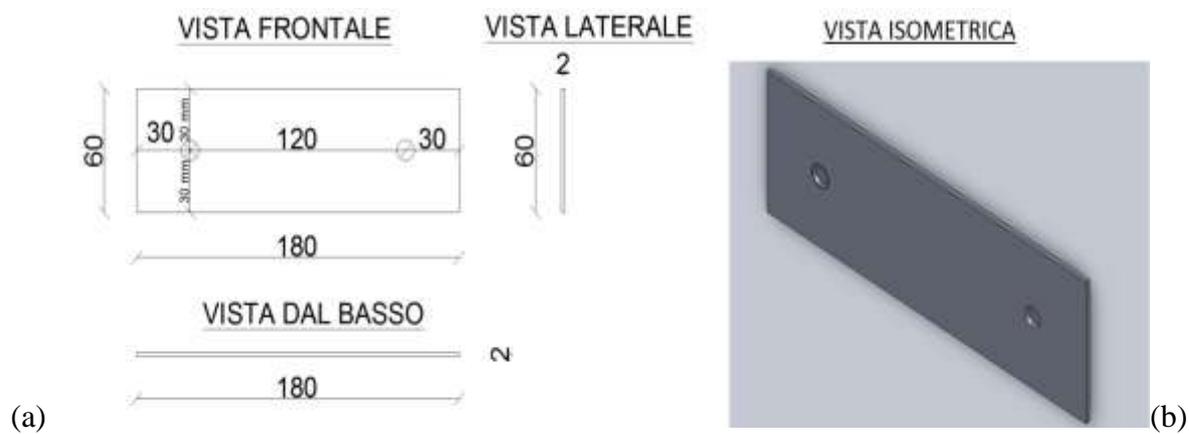


Fig. III.19 – Cravatta: (a) dettagli costruttivi
(b) vista tridimensionale



Fig. III.20 – Foto delle cravatte prodotte

Infine si riportano, di seguito, le immagini della simulazione della fase di assemblaggio e le foto della strumentazione completa realizzata.

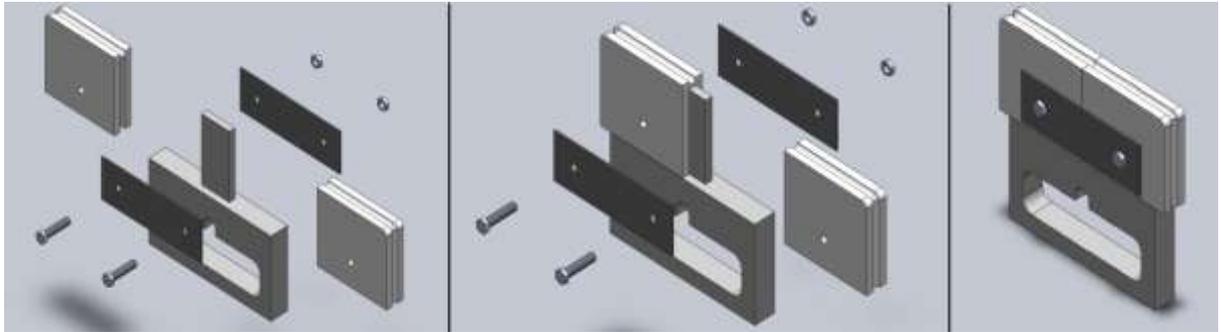


Fig. III.21 – Fasi di assemblaggio della strumentazione di prova



Fig. III.22 – Foto della strumentazione assemblata con una staffa campione



Per quanto riguarda lo svolgimento effettivo dei test, bisogna anzitutto sottolineare che le prove, in accordo con le linee guida, devono essere effettuate in condizioni standard di laboratorio: temperatura di 23 ± 3 °C e $50 \pm 10\%$ di umidità relativa.

Si descrivono ora le fasi pratiche, in ordine sequenziale, delle prove da effettuare:

1. Assemblare l'apparecchiatura di prova;
2. Alloggiare il campione da testare nella scanalatura che corre lungo i componenti del dispositivo di prova;
3. Collegare gli apparecchi di registrazione dati;
4. Applicare un piccolo carico sul provino (meno del 5% del carico di rottura previsto) per allineare l'apparecchiatura di prova e poi azzerare gli estensimetri;
5. Applicare il carico di trazione (allontanando reciprocamente le due parti centrali, quella superiore e quella inferiore) a velocità controllata fino al raggiungimento della rottura della staffa campione;
6. Registrare i valori tensione-deformazione;
7. Annotare il carico di rottura e la modalità della stessa.

Dunque si può calcolare la “Resistenza ridotta a trazione” con l'espressione (1)

$$(1) \quad S = \frac{P}{2A}$$

Dove:

S = resistenza ridotta a trazione corrispondente a una specifica zona d'angolo del campione,
in MPa;

P = carico di rottura a trazione del campione, in N;

A = area della sezione trasversale della staffa di prova, in mm²;

Si evidenzia che l'applicazione del carico può essere effettuata con 2 metodi differenti.

1° metodo: si utilizza un martinetto idraulico che va posto a contatto tra le due parti centrali della strumentazione in modo da allontanarle reciprocamente e quindi trasferire la sollecitazione di trazione alla staffa. E' evidente che, con questo metodo, le forcelle risultano essere superflue.



Fig. III.23 – Foto della strumentazione completa col 1° metodo di applicazione del carico

2° metodo: è fondamentale l'ausilio delle forcelle poiché la forza di trazione viene esercitata da un'apposita apparecchiatura che, attraverso delle ganasce, afferra la parte sporgente di entrambe le forcelle (sia quella superiore che quella inferiore) esercitando così una forza di trazione sulla staffa fino a portarla a rottura.



Fig. III.24 – Foto della strumentazione completa col 2° metodo di applicazione del carico



Infine si riporta di seguito la tabella riassuntiva dei risultati ottenibili da questa campagna sperimentale (i valori sono da inserire in quanto la campagna sperimentale è ancora in fase di esecuzione). Come si può notare in una colonna si fa riferimento al rapporto tra la resistenza a trazione della zona di piegatura e quella del tratto rettilineo (S/f_u) in modo da poterle confrontare e trarre le opportune considerazioni.

Diametro nominale	Provino	d_b [mm]	r_b [mm]	P [N]	A [mm ²]	S [Mpa]	S/f_u [%]	Durata [min.]
8-mm	STF. 1	8	7.5					
	STF. 2	8	7.5					
	STF. 3	8	7.5					
	STF. 4	8	7.5					
	STF. 5	8	7.5					
	STF. 6	8	7.5					
	STF. 7	8	7.5					
	STF. 8	8	7.5					
	STF. 9	8	7.5					
	STF. 10	8	7.5					
	STF. 11	8	7.5					
	STF. 12	8	7.5					
	STF. 13	8	7.5					
	STF. 14	8	7.5					
	STF. 15	8	7.5					
	STF. 16	8	7.5					
	STF. 17	8	7.5					
	STF. 18	8	7.5					
	STF. 19	8	7.5					
	STF. 20	8	7.5					

Tab. III.6 – Tabella riassuntiva dei risultati derivanti dalle prove sulle staffe

Dove:

S = resistenza ridotta a trazione corrispondente a una specifica zona d'angolo del campione,
in MPa;

P = carico di rottura a trazione del campione, in N;

A = area della sezione trasversale della staffa di prova, in mm²;



f_u = tensione ultima a trazione dei tratti rettilinei (in direzione parallela a quella delle fibre), in MPa.

Per la determinazione della resistenza a trazione della parte rettilinea sono state effettuati degli opportuni test su barre rettilinee in GFRP di diametro 8 mm che vengono spiegati e descritti nel capitolo successivo. Tali test sono stati avviati e portati a termine prima di effettuare i test sulle staffe per semplici motivi di priorità produttiva da parte dell'azienda ATP srl di Angri.

III.3 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI BARRE IN GFRP

In questo paragrafo è descritta l'attività delle prove di caratterizzazione meccanica (*prova monotona di trazione a controllo di forza*) di barre in GFRP, eseguite presso i laboratori della società ATP srl di Angri (Salerno); la società ATP opera nel settore dei compositi e si occupa della produzione stessa di compositi pultrusi in fibra di vetro e carbonio.

Tali prove sono state eseguite su barre in GFRP di diametro 8 mm in modo da poter comparare la resistenza a trazione offerta dalla parte longitudinale della staffa con quella offerta dalla parte piegata della stessa.

Per realizzare i test si è utilizzato un cilindro di acciaio, all'interno del quale è disposta la barra campione, come mostrato nella Figura III.25.



Fig. III.25 –Set-up impiegato per test di trazione su barre in FRP

La barra è bloccata alle due estremità tramite l'ausilio di morsetti; alla destra del cilindro di acciaio è posizionato un pistone che viene messo in azione da un martinetto idraulico, avente

il compito di sollecitare la barra, mentre alla sinistra dello stesso è presente una cella di carico che misura la forza applicata.

Le operazioni eseguite, come metodologia operativa sono:

1. Posizionamento della cella di carico sul lato sinistro del tubo di acciaio; la cella di carico viene utilizzata per stimare il carico stesso di rottura (Fig. III.26).



Fig. III.26 –Posizionamento cella di carico

2. Inserimento della barra di GFRP, del diametro desiderato all'interno del cilindro; nelle prove eseguite sono state utilizzate barre di diametro 8 mm. L'esecuzione operativa prevede di incollare, prima dell'inserimento delle stesse all'interno del cilindro in acciaio, due bulloni a una distanza di interesse (esempio 8 cm), questi bulloni servono per avvitarvi dei perni, i quali verranno fissati a dei basamenti che hanno la funzione di sostenere lo strumento di misura degli spostamenti (LVDT). L'incollaggio dei bulloni avviene attraverso l'uso di una apposita resina che si indurisce sotto l'azione dei raggi U.V., tali raggi vengono prodotti con una lampada apposita (Fig. III.27).



Fig. III.27 – Predisposizione base di lettura LVDT

3. A questo punto si va ad inserire la barra da testare nel tubo di acciaio e si posizionano i morsetti come nelle Figure III.28 e III.29.



Fig. III.28 – Serraggio della barra



Fig. III.29 - Particolare serraggio barra

4. Nella fase successiva si bloccano i perni ai due basamenti, dove va inserito lo strumento LVDT come in Figura III.30.



Fig. III.30 - Predisposizione basamento ospitante LVDT

5. Si applica il carico in maniera incrementale, attraverso un martinetto idraulico, fino al raggiungimento della rottura della barra.



Fig. III.31 – Applicazione degli incrementi di carico

6. Infine si effettua la lettura del diagramma forza-spostamento attraverso una centralina di acquisizione dati collegato con la Cella di Carico e l'LVDT.



Fig. III.32 – Postazione di acquisizione dati

Nelle figure successive (Fig. III.33-34-35) si riportano alcune immagini rappresentative delle tipiche modalità di rottura delle barre testate.



Fig. III.33 - Tipica modalità di crisi delle barre D8



Fig. III.34 - Tipica modalità di crisi delle barre del diametro D8



Fig. III.35 - Tipica modalità di crisi delle barre del diametro D8

Dopo aver eseguito la prova di Trazione, secondo le fasi precedentemente descritte, l'operazione successiva è stata il calcolo del *diametro equivalente*.

Infatti, va evidenziato che, industrialmente, la barra prodotta non avrà mai un diametro esatto di 8 mm, ma ci saranno delle tolleranze di realizzazione legate al processo produttivo.

La caratterizzazione della sezione equivalente associata alla generica barra di composito si effettua nel seguente modo, in accordo con le linee guida del CNR-DT 203/2006:

1. Esaminiamo la barra di riferimento (la lunghezza standard di normativa è pari a 200 mm) e misuriamo la lunghezza effettiva, con l'ausilio del calibro (la misurazione è necessaria per avere il dato reale rispetto allo standard, considerando che il taglio meccanico possa introdurre degli scostamenti reali rispetto al dato teorico);



Fig. III.36 - Stima della lunghezza del campione di barra

2. Si prende a riferimento un tubo di vetro graduato e viene riempito di 400 ml di acqua (il quantitativo d'acqua è uno standard definito dalla normativa) pari al volume di riferimento iniziale;



Fig. III.37 - Tubo di vetro impiegato per la stima del diametro equivalente

3. A questo punto si inserisce la barra nel tubo di vetro ottenendo il volume finale; la differenza tra il volume finale ed il volume iniziale corrisponde al volume della barra inserita nel tubo, definito volume dello spezzone;



Fig. III.38 - Immersione della barra nel tubo di vetro impiegato per la stima del diametro equivalente

4. Noto il volume dello spezzone (V_s) e la lunghezza della barra (L) è possibile calcolare l'area della sezione mediante la seguente formula:

$$A_b = \frac{V_s}{L}$$

Dunque possiamo determinare:

- La *Tensione di Rottura*, $f_{fu,p}$, mediante la relazione $f_{fu,p} = \frac{F_{fu,p}}{A_b}$



dove le variabili $F_{fu,p}$ ed A_b rappresentano, rispettivamente, la forza di rottura registrata e l'area equivalente del provino.

- Il *Modulo di Elasticità Normale a Trazione*, $E_{f,p}$, può essere determinato operando una regressione lineare sui dati acquisiti nell'intervallo compreso tra il 20% e il 50% della tensione di rottura, oppure, in alternativa, ricorrendo alla seguente formula semplificata:

$$E_{f,p} = \frac{F_1 - F_2}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot A_b}$$

in cui con F_1 ed ε_1 si sono indicate, rispettivamente, la forza e la deformazione corrispondenti al 50% della tensione di rottura; con F_2 ed ε_2 , rispettivamente, la forza e la deformazione corrispondenti al 20% della tensione di rottura.

- La *Deformazione Ultima del campione testato*, $\varepsilon_{fu,p}$, attraverso la seguente relazione:

$$\varepsilon_{fu,p} = \frac{F_{fu,p}}{E_{f,p} \cdot A_b}$$

A partire dai parametri meccanici così ottenuti per i singoli provini, si può risalire agevolmente ai valori caratteristici delle proprietà meccaniche della barra di FRP.



Diametro nominale	Provino	d_b [mm]	$f_{fu,p}$ [MPa]	$\varepsilon_{fu,p}$ [MPa]	f_1 [MPa]	f_2 [MPa]	ε_1 [-]	ε_2 [-]	E_f [GPa]	Durata [min.]
8-mm	8-VTR-02	8	1084	0.0246	542	217	0.0123	0.0049	44	3.37
	8-VTR-03	8	1168	0.0272	584	234	0.0136	0.0054	43	3.69
	8-VTR-04	8	1129	0.0275	565	226	0.0138	0.0055	41	4.61
	8-VTR-05	8	1129	0.0269	565	226	0.0134	0.0054	42	4.61
	8-VTR-06	8	1062	0.0253	531	212	0.0126	0.0051	42	3.28
	8-VTR-07	8	1080	0.0204	540	216	0.0102	0.0041	53	3.36
	8-VTR-08	8	1093	0.0238	547	219	0.0119	0.0048	46	3.59
	8-VTR-09	8	1070	0.0210	535	214	0.0105	0.0042	51	3.70
	8-VTR-11	8	1052	0.0210	526	210	0.0105	0.0042	50	2.94
	8-VTR-12	8	1214	0.0264	607	243	0.0132	0.0053	46	2.94
	8-VTR-13	8	1105	0.0235	553	221	0.0118	0.0047	47	2.57
	8-VTR-14	8	1228	0.0256	614	246	0.0128	0.0051	48	2.98
	8-VTR-15	8	1181	0.0227	591	236	0.0114	0.0045	52	2.98
	8-VTR-16	8	1089	0.0253	545	218	0.0127	0.0051	43	4.00
	8-VTR-17	8	1142	0.0254	571	228	0.0127	0.0051	45	3.52
	8-VTR-18	8	1069	0.0191	535	214	0.0095	0.0038	56	3.08
	8-VTR-19	8	1047	0.0184	524	209	0.0092	0.0037	57	2.99
	8-VTR-20	8	1065	0.0184	533	213	0.0092	0.0037	58	3.24
	8-VTR-21	8	1013	0.0236	507	203	0.0118	0.0047	43	2.29
	8-VTR-22	8	1351	0.0255	676	270	0.0127	0.0051	53	3.37

Tab. III.7 – Risultati delle prove delle barre D8 sulla base del diametro nominale

Diametro equivalente	Provino	d_b [mm]	$f_{fu,p}$ [MPa]	$\varepsilon_{fu,p}$ [MPa]	f_1 [MPa]	f_2 [MPa]	ε_1 [-]	ε_2 [-]	E_f [GPa]	Durata [min.]
8.07-mm	8-VTR-02	7.99	1087	0.0247	544	217	0.0124	0.0049	44	3.37
	8-VTR-03	7.98	1174	0.0273	587	235	0.0137	0.0055	43	3.69
	8-VTR-04	8.02	1124	0.0281	562	225	0.0141	0.0056	40	4.61
	8-VTR-05	7.99	1132	0.0270	566	226	0.0135	0.0054	42	4.61
	8-VTR-06	8.19	1013	0.0253	507	203	0.0127	0.0051	40	3.28
	8-VTR-07	7.99	1082	0.0204	541	216	0.0102	0.0041	53	3.36
	8-VTR-08	8.20	1040	0.0242	520	208	0.0121	0.0048	43	3.59
	8-VTR-09	7.79	1128	0.0213	564	226	0.0106	0.0043	53	3.70
	8-VTR-11	7.90	1079	0.0212	540	216	0.0106	0.0042	51	2.94
	8-VTR-12	7.89	1248	0.0266	624	250	0.0133	0.0053	47	2.94
	8-VTR-13	7.80	1165	0.0238	583	233	0.0119	0.0048	49	2.57
	8-VTR-14	8.37	1122	0.0261	561	224	0.0130	0.0052	43	2.98
	8-VTR-15	8.39	1074	0.0229	537	215	0.0114	0.0046	47	2.98
	8-VTR-16	7.56	1220	0.0254	610	244	0.0127	0.0051	48	4.00
	8-VTR-17	8.39	1087	0.0253	544	217	0.0126	0.0051	43	3.52
	8-VTR-18	8.32	998	0.0192	499	200	0.0096	0.0038	52	3.08
	8-VTR-19	8.26	982	0.0185	491	196	0.0093	0.0037	53	2.99
	8-VTR-20	8.39	968	0.0183	484	194	0.0091	0.0037	53	3.24
	8-VTR-21	8.00	1096	0.0249	548	219	0.0125	0.0050	44	2.29
	8-VTR-22	7.99	1351	0.0255	676	270	0.0127	0.0051	53	3.37

Tab. III.8 – Risultati delle prove delle barre D8 sulla base del diametro equivalente



CAPITOLO IV

CONCLUSIONI

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è stato quello di progettare la campagna sperimentale di caratterizzazione meccanica di staffe in GFRP (staffe rinforzate a matrice polimerica con fibre di vetro). Si è reso necessario, per gli scopi preposti, progettare e realizzare il set-up utile per testare le staffe, ponendo poi l'attenzione sulle prove vere e proprie. Per ragioni di produttività interna all'azienda ATP srl, è stato possibile realizzare dapprima prove, monotone di trazione a carico controllato, su barre in GFRP di diametro uguale a quello delle staffe in modo da conoscere la resistenza ultima a trazione delle parti rettilinee della staffa, per poi passare alle prove sulle staffe allo scopo di valutare la resistenza a trazione delle parti piegate e quindi l'influenza della stessa sulla resistenza totale. Test preliminari eseguiti sulle staffe mediante il set-up progettato hanno evidenziato la crisi delle stesse in corrispondenza della zona immediatamente adiacente a quella d'angolo simili a quelli ottenuti dagli studi, presenti in letteratura scientifica.

Tuttavia la campagna sperimentale, per quanto concerne i test sulle staffe al fine di conoscere le proprietà meccaniche delle parti curve, è ancora oggi in itinere; quindi si hanno a disposizione i risultati numerici relativi alla resistenza a trazione delle parti rettilinee (in direzione parallela a quella delle fibre) ma non di quelle piegate.

Nel contempo, da queste prove ci si attendono risultati simili a quelli ottenuti dagli studi, presenti in letteratura scientifica, precedentemente realizzati in Canada, Stati Uniti e Gran Bretagna.

Dunque si può affermare che:



- *la resistenza a trazione delle parti rettilinee* (in direzione parallela a quelle delle fibre) varia da 1.013 a 1.351 MPa con una resistenza media di 1.381 MPa.
- *Le modalità di rottura delle staffe* sono dislocate in corrispondenza della zona immediatamente adiacente a quella d'angolo.
- *La resistenza a trazione in corrispondenza della zona di piegatura* è significativamente inferiore rispetto a quella offerta dal materiale parallelo alla direzione delle fibre. Infatti la resistenza a trazione della parte piegata, attendibilmente, è il 35 ÷ 60% di quella della parte rettilinea; ciò è da attribuire alla concentrazione delle sollecitazioni nella zona citata e alla debolezza intrinseca delle fibre perpendicolari all'asse della staffa oltre al fenomeno di attorcigliamento delle stesse in corrispondenza della parte più interna della piegatura.
- La resistenza alla trazione aumenta con l'aumentare del raggio di curvatura della staffa.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRP) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures (ACI 440.3R-04).*
- [2] *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Armato con Barre di Materiale Composito Fibrorinforzato (CNR – DT 203/2006).*
- [3] *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato (CNR – DT 204/2006).*
- [4] NTC 2008, *Norme tecniche per le costruzioni* – D.M. 14 Gennaio 2008, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n.29 del 4.2.2008.
- [5] *Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars – ASTM D 7205/D 7205M – 2006.*
- [6] Task Group 9.3 – *FRP (Fibre Reinforced Polymer) Reinforcement for Concrete Structures* – 2005.
- [7] CAN/CSA – S6 – 2000, per ponti.
- [8] CAN/CSA – S6 – 2002, per edifici.
- [9] Documento Giapponese: JSCE – 1997.
- [10] *Experimental Study on Tensile Strength of Bent Portion of FRP Rods (1993)* – Takehiko Maruyama, Masato Honma e Hajime Okamura.
- [11] *Bent Effect on Strength of CFRP Stirrups* – R. Morphy, E. Shehata e S. Rizkalla – Morphy et al. (1997).



- [12] *Mechanical and Structural Characterization of New Carbon FRP Stirrups for Concrete Members* - Journal Of Composites For Construction © Asce / July/August 2007.
- [14] *Mechanical Performance of Curved FRP Rebars - Part I: Experimental Study* – Asia – Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS 2007) S.T. Smith (ed) © 2007 International Institute for FRP in Construction.
- [15] *Bend Strength of FRP Stirrups: Comparison and Evaluation of Testing Methods* - Journal Of Composites For Construction © Asce / January/February 2010.

