

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

ANALISI STATISTICA DELLE PROPRIETA' MECCANICHE DI BARRE IN GFRP

RELATORI

Ch.mo Prof. Dott. Ing. Gaetano MANFREDI

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

CANDIDATO

Piera Salzano

Matr. N38/043

CORRELATORI

Ch.mo Dott.Ing. Fabio NARDONE

ANNO ACCADEMICO 2011/12



CAPITOLO 2	41
LINEE GUIDA PER LA CARATTERIZZAZIONE DI BARRE IN FRP	
2.1 TIPOLOGIE DI PROVE PER LA CARATTERIZZAZIONE DI BARRE DI FRP UTILIZZATE COME RINFORZO DI STRUTTURE IN CALCESTRUZZO (ACI 440.3R-04)	41
2.2 LINEE GUIDA CNR-DT 203/2006	57
2.2.1 PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI BARRE	61
2.2.1.1 CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DI BARRE IN FRP	61
2.2.1.2 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI BARRE IN FRP	63
2.2.1.3 SCHEDA TECNICA PER BARRE IN FRP	65
2.3 METODO DI PROVA A TRAZIONE DI BARRE IN FRP IN ACCORDO ALL'ASTM D7205	67
2.3.1 CAMPIONAMENTO E TEST	70
2.4 LIMITI DIMENSIONALI DELLA STRUMENTAZIONE DI PROVA	73
CAPITOLO 3	75
CONFRONTO TRA TEST DI CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI BARRE IN GFRP ESEGUITI CON LA MACCHINA UNIVERSALE E LA STRUMENTAZIONE PROPOSTA	
3.1 PROVE A TRAZIONE ESEGUITE CON LA MACCHINA UNIVERSALE	75
3.2 PROVE A TRAZIONE ESEGUITE CON LA STRUMENTAZIONE PROPOSTA	77
3.3 APPLICAZIONE DELL'ANOVA TEST PER DIFFERENTI TIPOLOGIE DI PROVE DI CARATTERIZZAZIONE MECCANICA	81
CAPITOLO 4	90
PROVE SPERIMENTALI EFFETTUATE SU BARRE IN GFRP ATTRAVERSO LA STRUMENTAZIONE PROPOSTA	
4.1 CALCOLO DEL DIAMETRO EQUIVALENTE DELLE BARRE	90
4.2 RISULTATI DELLE PROVE A TRAZIONE ESEGUITE SU BARRE DI DIFFERENTE DIAMETRO	92
CAPITOLO 5	100
ELABORAZIONE STATISTICA	



5.1 TEST DI KOLMOGOROV-SMIRNOV	100
5.2 APPLICAZIONE DELL'ANOVA TEST PER BARRE DI DIFFERENTE DIAMETRO	106
CAPITOLO 6	117
CONCLUSIONI	
BIBLIOGRAFIA	119



INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1- Barre e staffe di GFRP	13
Figura 1.2- Rotoli di Fibre	14
Figura 1.3- a) Tessuto in fibre di Carbonio, b) Tessuto in fibre di Aramide, c) Tessuto in fibre di Vetro, d) Tessuto ibrido Vetro/Aramide	15
Figura 1.4- Tipologie di Fibre	16
Figura 1.5- Lamina di CFRP	17
Figura 1.6- Barre tipiche di GFRP in commercio	20
Figura 1.7- Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo del comportamento a trazione monoassiale	22
Figura 1.8- Rotoli di fibre basaltiche	25
Figura 1.9- Matrice	26
Figura 1.10- Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito	28
Figura 1.11- Legami costitutivi di fibre, matrice e corrispondente composito	29
Figura 1.12- Tipologie di barre di FRP a sezione circolare presenti in commercio	30
Figura 1.13- Fessurazione indotta dalle tensioni circonferenziali	31
Figura 1.14- Legame costitutivo, confronto FRP-Acciaio	34
Figura 1.15- Flat Coupon test	35
Figura 2.1- Modalità di rottura di una barra in VTR	46
Figura 2.2- Test di aderenza per la barra disposta verticalmente	49
Figura 2.3- Test di aderenza per le barre disposte orizzontalmente	49
Figura 2.4- Schema dettagliato dell'apparecchio di prova	50
Figura 2.5- Apparecchio di prova per la determinazione della resistenza a taglio delle barre	51
Figura 2.6- Configurazione di un campione per la determinazione della resistenza nella piegatura	52
Figura 2.7- Apparecchiatura di prova per la determinazione della resistenza nella piegatura	54
Figura 2.8- Dimensioni del cilindro di calcestruzzo	55
Figura 2.9- Dispositivi di afferraggio delle barre per test di trazione	64
Figura 2.10- Lunghezze di ancoraggio delle barre per test di trazione	72
Figura 3.1 –MTS Servo Hydraulic Load Frames	75
Figura 3.2 –Predisposizione barra	76
Figura 3.3 – Tipica modalità di rottura delle barre dal diametro 10mm	77
Figura 3.4 – Tipica modalità di crisi dei 5 provini testati	77
Figura 3.5 –Set-up impiegato per test di trazione	78



Figura 3.6 –Posizionamento cella di carico.	78
Figura 3.7 –Predisposizione base di lettura LVDT.	79
Figura 3.8 –Serraggio della barra	80
Figura 3.9 –Particolare serraggio barra	80
Figura 3.10 –Predisposizione basamento ospitante LVDT	81
Figura 4.1 –Stima della lunghezza del campione della barra.	91
Figura 4.2 – Tubo di vetro graduato impiegato per la stima del diametro equivalente	91
Figura 4.3 –Immersione di barra nel tubo di vetro impiegato per determinazione di diametro equivalente.	92
Figura 4.4 -Tipica modalità di crisi delle barre del diametro 8mm.	93
Figura 4.5 -Tipica modalità di crisi delle barre del diametro 10mm	93
Figura 4.6 -Tipica modalità di crisi delle barre del diametro 14mm	94
Figura 5.1 -Test di Kolmogorov-Smirnov per barre con diametro 8 mm	102
Figura 5.2 -Test di Kolmogorov-Smirnov per barre con diametro 10 mm	104
Figura 5.3 -Test di Kolmogorov-Smirnov per barre con diametro 14 mm	106



INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.1 – Proprietà delle varie fibre di vetro	19
Tabella 1.2 – Coefficienti di dilatazione termica	30
Tabella 1.3 – Valori tipici di densità di barre per armatura interna, g/cm ³ (da ACI 440.1R-06)	36
Tabella 2.1 – Metodi di test per barre utilizzate come rinforzo per calcestruzzo	42
Tabella 3.1 – Risultati delle prove delle barre con diametro 10mm	76
Tabella 3.2 – Risultati delle prove delle barre con diametro 10mm sulla base del diametro nominale	81
Tabella 3.3 – Dati relativi al primo gruppo costituito da barre con diametro 10 mm riferendosi ai valori di resistenza a trazione .	82
Tabella 3.4 – Dati relativi al secondo gruppo costituito da barre con diametro 10 mm riferendosi ai valori di resistenza a trazione	83
Tabella 3.5 – Procedura primo test ANOVA.	86
Tabella 3.6 – Tabella riassuntiva primo test ANOVA	86
Tabella 3.7 – Dati relativi al primo gruppo costituito da barre con diametro 10 mm riferendosi ai valori di modulo elastico	87
Tabella 3.8 – Dati relativi al secondo gruppo costituito da barre con diametro 10 mm riferendosi ai valori di modulo elastico	87
Tabella 3.9 – Procedura secondo test ANOVA	87
Tabella 3.10 – Dati relativi al primo gruppo costituito da barre con diametro 10 mm riferendosi ai valori di deformazione ultima	88
Tabella 3.11 – Dati relativi al secondo gruppo costituito da barre con diametro 10 mm riferendosi ai valori di deformazione ultima	88
Tabella 3.12 – Procedura terza test ANOVA	88
Tabella 4.1 – Risultati delle prove delle barre con diametro 8mm sulla base del diametro nominale	95
Tabella 4.2 – Risultati delle prove delle barre con diametro 8mm sulla base del diametro equivalente	95
Tabella 4.3 – Risultati delle prove delle barre con diametro 10mm sulla base del diametro nominale	96
Tabella 4.4 – Risultati delle prove delle barre con diametro 10mm sulla base del diametro equivalente	96



Tabella 4.5 – Risultati delle prove delle barre con diametro 14mm sulla base del diametro nominale	97
Tabella 4.6 – Risultati delle prove delle barre con diametro 14mm sulla base del diametro equivalente	97
Tabella 4.7 – Caratteristiche meccaniche sulla base del diametro nominale	98
Tabella 4.8 – Caratteristiche meccaniche sulla base del diametro equivalente	98
Tabella 5.1 – Risultati delle test di adattamento delle barre con diametro 8mm	101
Tabella 5.2 – Risultati delle test di adattamento delle barre con diametro 10mm	103
Tabella 5.3 – Risultati delle test di adattamento delle barre con diametro 14mm	105
Tabella 5.4 – Dati relativi al primo gruppo costituito da barre con diametro 8 mm riferendosi ai valori di resistenza a trazione.	107
Tabella 5.5 – Dati relativi al secondo gruppo costituito da barre con diametro 10 mm riferendosi ai valori di resistenza a trazione.	108
Tabella 5.6 – Dati relativi al terzo gruppo costituito da barre con diametro 14 mm riferendosi ai valori di resistenza a trazione .	109
Tabella 5.7 – Procedura primo test ANOVA.	110
Tabella 5.8 – Tabella riassuntiva primo test ANOVA	111
Tabella 5.9 – Dati relativi al primo gruppo costituito da barre con diametro 8 mm riferendosi ai valori di modulo elastico.	111
Tabella 5.10 – Dati relativi al secondo gruppo costituito da barre con diametro 10 mm riferendosi ai valori di modulo elastico.	112
Tabella 5.11 – Dati relativi al terzo gruppo costituito da barre con diametro 14 mm riferendosi ai valori di modulo elastico.	113
Tabella 5.12 – Procedura secondo test ANOVA	113
Tabella 5.13 – Dati relativi al primo gruppo costituito da barre con diametro 8 mm riferendosi ai valori di deformazione ultima.	114
Tabella 5.14 – Dati relativi al secondo gruppo costituito da barre con diametro 10 mm riferendosi ai valori di deformazione ultima.	115
Tabella 5.15 – Dati relativi al terzo gruppo costituito da barre con diametro 14 mm riferendosi ai valori di deformazione ultima.	116
Tabella 5.16 – Procedura terzo test ANOVA	116



INTRODUZIONE

I materiali compositi fibrorinforzati, noti con l'acronimo inglese di FRP, *Fiber Reinforced Polymer*, sono materiali composti generalmente da fibre lunghe ad elevata resistenza immerse in una matrice polimerica di natura organica. Le fibre hanno il compito principale di essere gli elementi resistenti del materiale ed esibiscono resistenze assiali molto elevate quando sottoposte a sforzi di trazione. La matrice polimerica, più comunemente nota come resina, ha invece la funzione di proteggere le fibre dall'usura ed eventuali danneggiamenti esterni, assicurare un buon allineamento delle fibre e garantire che ci sia una buona distribuzione degli sforzi fra le fibre in modo che tutte siano sollecitate in modo uniforme.

Il concetto che sta alla base dei materiali compositi può essere ritrovato nell'utilizzo della paglia nei mattoni, utilizzata dalle antiche civiltà egizie e israelite (800 a.C.). Nella civiltà moderna, fibre corte di vetro sono state usate negli Stati Uniti d'America, agli inizi del 1930, per rinforzare il calcestruzzo. I compositi FRP sono la più recente evoluzione di questa antica idea di combinare due diversi materiali per comporne uno composito dalle qualità migliori. L'industria automobilistica per prima, nel 1950, introdusse i materiali compositi nella costruzione dei veicoli. Anche l'industria aerospaziale introdusse l'uso dei compositi FRP per il loro basso peso e la loro elevata resistenza e rigidità. Nelle costruzioni civili la prima applicazione risale ad una struttura a cupola costruita nel 1968 a Benghazi in Libia, a cui seguirono altre opere. Ricerche parallele sono state condotte sugli FRP anche in Europa e in Giappone. Il loro primo utilizzo in Europa è datato 1986 e riguarda un ponte in calcestruzzo preteso.

I compositi polimerici fibrorinforzati sono stati introdotti nell'industria delle costruzioni negli ultimi anni come possibile sostituto delle armature in acciaio. Agli inizi degli anni '90 lo stato di deterioramento delle infrastrutture negli Stati Uniti d'America, in particolare



l'ammaloramento dovuto alla corrosione delle armature di acciaio nei viadotti, costrinse gli ingegneri strutturisti a cercare tipologie alternative per armare le strutture in calcestruzzo.

L'utilizzo delle barre in FRP come sostituto delle armature di acciaio è risultato essere una promettente soluzione a questo problema, poiché gli FRP posseggono proprietà straordinarie, quali resistenza alla corrosione, buona resistenza a fatica e all'umidità, elevato rapporto resistenza peso e trasparenza elettromagnetica; questi hanno trovato, quindi, un crescente numero di applicazioni nelle costruzioni civili, sia come rinforzo esterno sia come armatura interna per elementi in calcestruzzo. Le strutture civili realizzate in calcestruzzo armato con barre di acciaio sono suscettibili alle azioni climatiche e normalmente portano allo sviluppo di un processo elettrochimico che conduce alla corrosione dell'armatura metallica. Infatti, 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).

E' necessaria, dunque, una costante manutenzione per accrescere il ciclo di vita di queste strutture. L'utilizzo di barre di FRP come armatura interna per solette e travi da ponte, che per la loro configurazione strutturale sono direttamente esposte alle azioni climatiche e ai crescenti carichi mobili da traffico, potrebbe accrescere molto la vita di servizio della struttura.

Le ragioni che conducono alla scelta dei FRP possono essere legate non solo all'esigenza di garantire un'adeguata durabilità dell'opera, ma anche alla possibilità di avvalersi di altre vantaggiose 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).

I materiali compositi possono essere costituiti da tre diverse tipologie di fibre:

- Fibra di vetro, nota con l'acronimo di GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) o PRFV (Poliestere Rinforzato con Fibra di Vetro);
- Fibra di carbonio, nota come CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*);
- Fibra di aramide, nota come AFRP (*Aramidic Fiber Reinforced Polymer*).

Lo scopo di questo lavoro di tesi è quello di fornire un metodo alternativo per la caratterizzazione meccanica delle barre in GFRP; tale metodo consiste nell'impiego di una strumentazione sostitutiva costituita da un cilindro d'acciaio, al cui interno viene disposta la barra campione per l'intera lunghezza libera da testare.

Tramite l'impiego di tecniche statistiche di elaborazione dati, e in particolar modo dell'Analisi della Varianza e del test di Kolmogorov-Smirnov, è stato possibile ottenere i seguenti risultati:

- Raggiungere una valida stima statistica della distribuzione della resistenza a trazione delle barre testate;
- Validare la strumentazione di prova proposta.



A tal proposito, sono stati testati 5 provini di barre in GFRP sia attraverso l'impiego della macchina universale MTS810 che la strumentazione proposta.

Il raggiungimento di risultati soddisfacenti e validi ha reso possibile l'impiego della strumentazione proposta per la caratterizzazione meccanica di gruppi di barre in GFRP di differente diametro.

Sono state eseguite, infatti, 60 prove di trazione su campioni di barre di armatura in vetroresina (VTR), di cui 20 caratterizzate da un diametro nominale di 8 mm, 20 caratterizzate da diametro nominale di 10 mm e 20 caratterizzate da diametro nominale di 14 mm.

Le prove sono state condotte secondo le indicazioni delle linee guida CNR-DT 203/2006 per barre in GFRP del diametro di 8, 10 e 14 mm.

Tutte le barre sono state fornite dallo stesso produttore, ovvero l'azienda ATP srl.

CAPITOLO I

I MATERIALI FIBRORINFORZATI

Gli FRP sono materiali fibrorinforzati a matrice polimerica, eterogenei ed anisotropi, e fanno parte della vasta gamma dei materiali detti *compositi*.

I compositi fibrorinforzati a matrice polimerica sono costituiti da fibre di rinforzo e da una matrice polimerica di natura organica.

I vantaggi del FRP sono molteplici: leggerezza, elevate proprietà meccaniche, caratteristiche anticorrosive, semplicità di messa in opera, durabilità nel tempo, elevata resistenza a trazione.

I materiali compositi presi in esame si presentano sotto forma di tessuti, lamine, griglie e barre (Fig.1.1).



Fig.1.1 – Barre e staffe di GFRP

1.1 CARATTERISTICHE DEI COMPOSITI E DEI LORO COMPONENTI

I materiali compositi sono costituiti da due o più materiali (fasi) di natura diversa e macroscopicamente distinguibili; inoltre, almeno due delle fasi presentano proprietà fisiche e

meccaniche sufficientemente diverse tra loro, in modo da impartire al composito proprietà differenti da quelle dei costituenti.

Negli FRP si possono dunque distinguere fasi chimicamente differenti ed aventi proprietà chimico-meccaniche diverse, tra le quali si colloca una superficie d'interfaccia; essi sono costituiti da:

- Fase fibrosa: materiale anisotropo costituito da fibre di rinforzo che raggiunge il 65% del composito (Fig. 1.2);
- Fase matrice: ossia una matrice polimerica di natura organica che può essere considerata come un continuo isotropo;
- Fase interfaccia: uno strato molto sottile localizzato sulla superficie del rinforzo, intermedia fra la fase fibrosa e la fase matrice. Essa non contribuisce direttamente alle proprietà meccaniche del composito, ma è fondamentale per il successo del sistema complessivo.



Fig. 1.2 – Rotoli di Fibre

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

1.2 FASE FIBROSA

La fase fibrosa svolge la funzione portante, ad essa spetta il ruolo di garantire la dovuta resistenza alle sollecitazioni. Le fibre hanno un'elevata resistenza a trazione e rappresentano pertanto gli elementi resistenti del materiale fibrorinforzato. Infatti, quando un materiale fibrorinforzato subisce uno sforzo assiale di trazione, gli sforzi veri e propri vengono assorbiti dalle fibre, mentre alla matrice polimerica si demanda il solo compito di distribuzione degli stessi fra le fibre, determinando uniformità di sollecitazione fra queste. Le fibre sono, inoltre, caratterizzate da un elevato modulo elastico (E). Esse si presentano sotto forma di filamenti continui molto sottili, difficili da manipolare singolarmente e, al fine di renderle più maneggevoli all'uso, si costruiscono veri e propri tessuti con svariate maglie, come si può notare dalla Fig. 1.3.

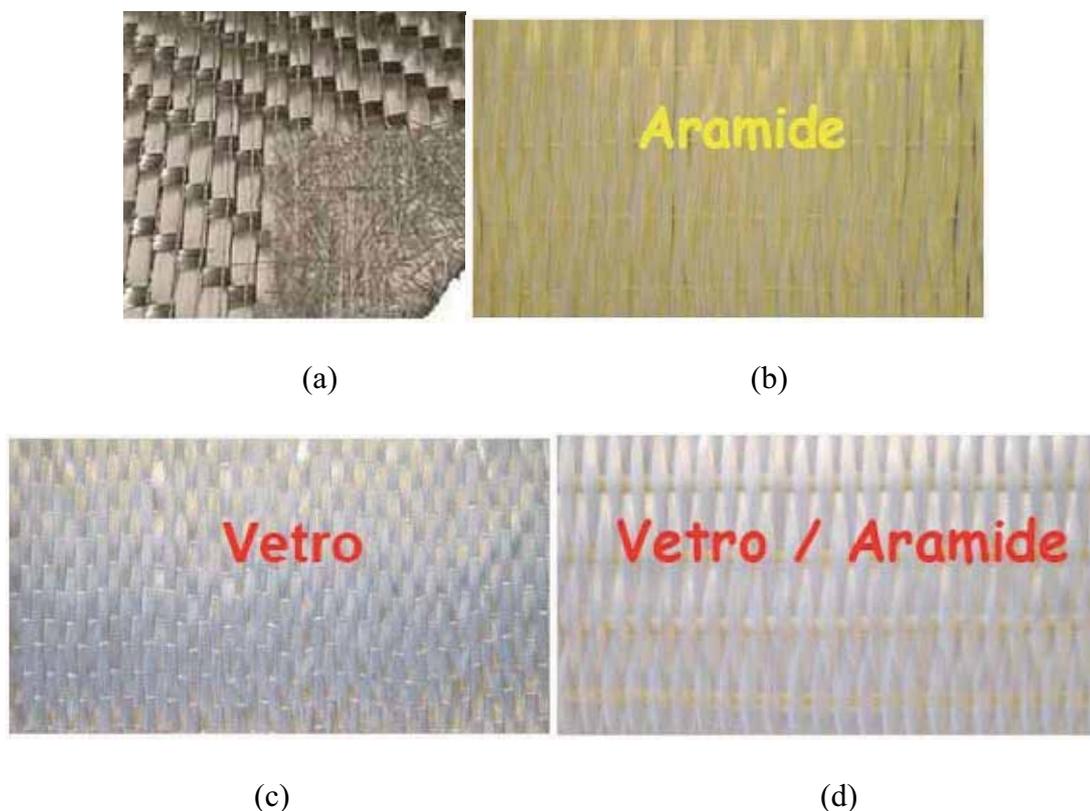


Fig. 1.3 – a) Tessuto in fibre di Carbonio, b) Tessuto in fibre di Arammide, c) Tessuto in Fibre di vetro, d) Tessuto ibrido Vetro/Aramide

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

A seconda che si adottino fibre lunghe o corte, si otterranno comportamenti differenti del materiale. Generalmente le fibre sono costituite da filamenti continui molto sottili, diametro di circa $10\mu\text{m}$ (10^{-6}m), che commercialmente sono disponibili sotto varie forme tra cui le più comuni sono (Fig. 1.4):

- Singolo filamento (*monofilament*);
- Fascio di filamenti o cavo di filatura (*tow*): formato da migliaia di filamenti paralleli fra loro, assemblati senza torsione;
- Filo o filato (*spun yarn*): ottenuto da migliaia di filamenti paralleli fra loro assemblati mediante torsione;
- Filo assemblato (*roving*): filo ottenuto assemblando senza torsione un certo numero di *spun yarn* disposti parallelamente fra loro;

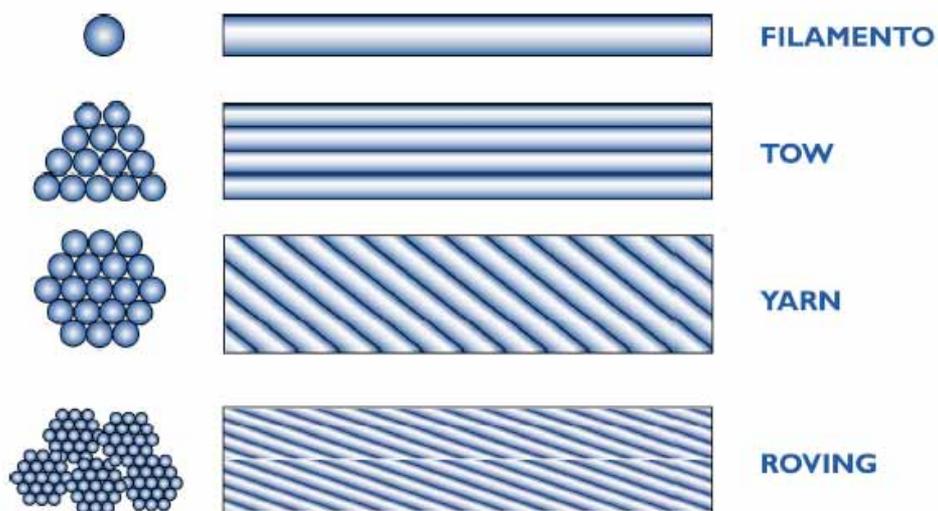


Fig. 1.4– Tipologie di Fibre

Un singolo strato di tessuto prende il nome di *lamina* mentre la sovrapposizione di più strati di tessuto viene detto *laminato*.

I tessuti si distinguono in:

- Unidirezionali (o uniassiali): in cui le fibre sono tutte orientate 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: in cui le fibre sono orientate in diverse direzioni del piano.

Essi sono generalmente disponibili allo stato secco, bisogna poi provvedere all'impregnatura con apposite resine direttamente in cantiere. Il mercato offre altresì tessuti pre-impregnati (Fig. 1.5)

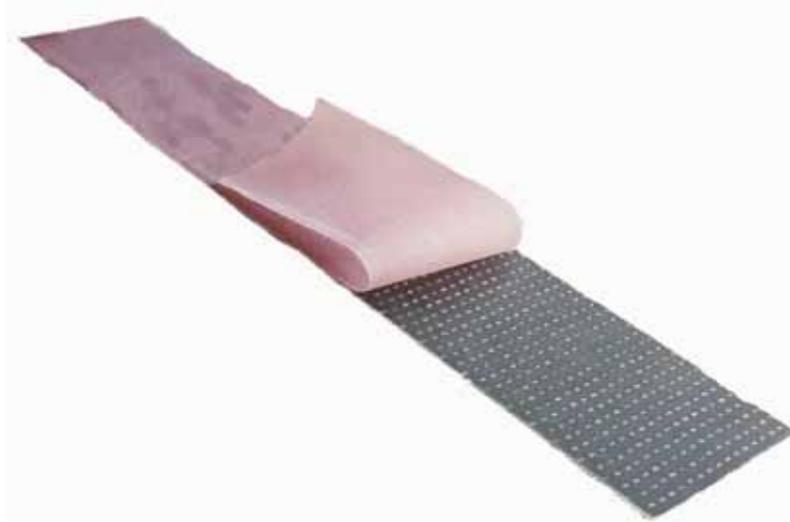


Fig. 1.5 – Lamina di CFRP

1.2.1 PRINCIPALI FIBRE PER I COMPOSITI

Le fibre sintetiche impiegate nella realizzazione di questo tipo di prodotto sono molteplici; 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 e che le proprietà meccaniche variano a seconda della tipologia di fibra utilizzata.

Le principali tipologie di fibre sono:

- Fibre di vetro;
- Fibre di carbonio;
- Fibre aramidiche.

1.2.1.1 FIBRE DI VETRO

Le fibre di vetro sono comunemente usate in campo navale ed industriale per la fabbricazione di compositi con prestazioni medio-alte e sono molto diffuse nell'ambito civile dato l'ottimo rapporto qualità-prezzo. Si distinguono per la loro elevata resistenza; presentano un modulo di elasticità normale inferiore a quelle di carbonio e aramidiche (circa 70 GPa) ed una resistenza all'abrasione relativamente modesta, che richiede una certa cautela nelle operazioni di manipolazione prima dell'impregnazione. Inoltre, presentano un ottimo isolamento e una dilatazione termica simile a quella dell'acciaio.

Presentano, infine, una certa attitudine allo scorrimento viscoso ed una modesta resistenza a fatica.

Al fine di migliorare l'adesione tra fibre e matrice, e di proteggere le fibre dall'azione degli agenti alcalini e dall'umidità, le fibre sono sottoposte a trattamenti di ensimaggio (*sizing*) con sostanze chimiche aventi funzione compatibilizzante.

Al variare dei composti presenti nella pasta fusa si ottengono diverse classi di Fiber Glass:

- E-Glass: costituite da silicati di calcio, il loro uso è previsto nel caso in cui 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 elevata corrosione;
- AR-Glass: costituite da ossido di zirconio; mantengono un'elevata resistenza meccanica anche in ambienti alcalini. Queste fibre si prestano ad essere utilizzate con una matrice a base di calcestruzzo.

E' possibile, quindi, riassumere le caratteristiche delle varie tipologie di fibre di vetro nella seguente tabella (Tabella 1.1):

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 delle fibre 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.

Nella Figura 1.6 vengono mostrate tipiche barre in GFRP:

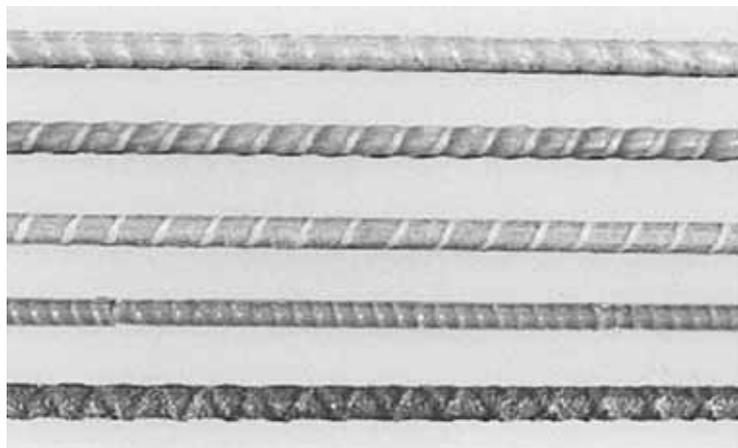


Fig. 1.6- Barre tipiche di GFRP in commercio

1.2.1.2 FIBRE DI CARBONIO

Le fibre di carbonio sono usate per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni e si distinguono per l'alto modulo di elasticità normale e l'elevata resistenza, specialmente nei confronti dei comuni materiali da costruzione. Esibiscono un comportamento a rottura intrinsecamente fragile con un assorbimento di energia relativamente modesto, anche se i carichi di rottura sono elevati. Tra le caratteristiche significative spiccano anche la bassa densità, la capacità di isolamento termico, la resistenza a variazioni di temperatura e all'effetto di agenti chimici ed, infine, buone proprietà ignifughe. Di contro il materiale risulta non omogeneo e presenta spesso un'evidente anisotropia e quindi le sue caratteristiche meccaniche hanno una direzione privilegiata.

A confronto con le fibre di vetro e con quelle aramidiche, le fibre dicarbonio 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 delle fibre di carbonio non è completamente cristallina come quella della grafite, che, invece, è di tipo esagonale, con gli atomi di carbonio organizzati in molecole essenzialmente planari, tenute insieme da forze trasversali d'interazione del tipo *Van der Waals*, di gran lunga più deboli rispetto a quelle che agiscono tra gli atomi di carbonio nel piano. E' proprio per tale motivo che 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).

Si parla di “*fibre di grafite*” per indicare fibre con un contenuto di carbonio maggiore del 99%; si parla, invece, di “*fibre di carbonio*” per indicare 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 CRFP.

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

- resistenza e rigidezza 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;
- $E_c=290\div 340\text{GPa}$;
- $f_c=2400\div 5700\text{MPa}$;
- $\varepsilon_{cu}=0,3\div 1,8\%$.

1.2.1.3 FIBRE ARAMIDICHE

Le fibre aramidiche furono introdotte per la prima volta nel 1971, sono fibre di natura organica costituite da poliammidi aromatiche in forma estremamente orientata.

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 quelli delle fibre di carbonio (Fig. 1.7). Le fibre aramidiche possono degradarsi per esposizione prolungata alla luce solare con perdite della resistenza a trazione fino al 50%; inoltre possono risultare sensibili all'umidità.

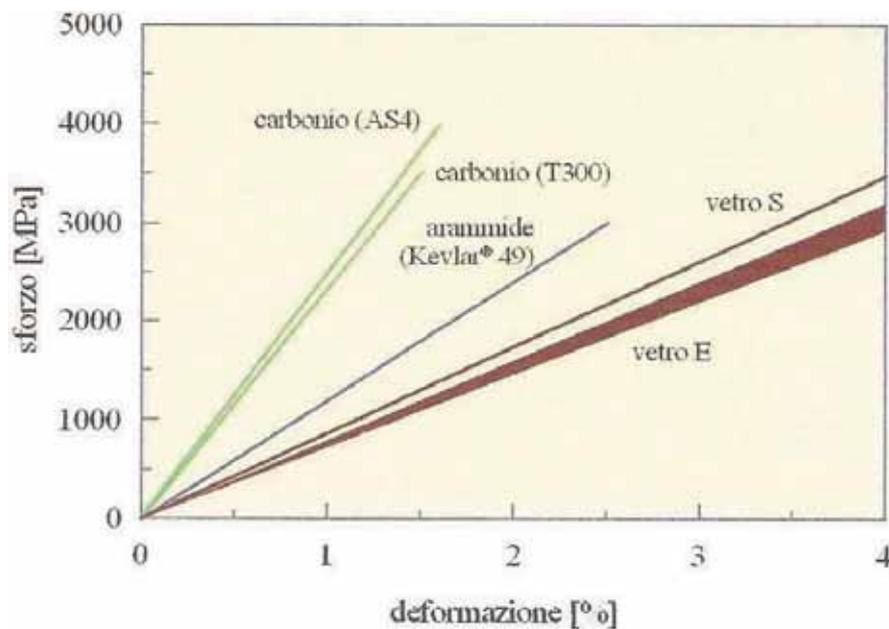


Fig. 1.7– Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo del comportamento a trazione monoassiale

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*).

Il comportamento viscoso (*creep*) è simile a quello delle fibre di vetro, la differenza consiste nel fatto che la loro 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 e alta velocità del polimero in soluzione, con successivo raffreddamento veloce (*quenching*) ed essiccamento. La sintesi del polimero è effettuata a monte dell'apparecchiatura di estrusione con l'impiego di soluzioni acide.

È possibile sottoporre le fibre così prodotte a un trattamento di orientazione a caldo per avvolgimento su bobine rotanti a 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;
- $E_A = 62 \div 142 \text{ GPa}$;
- $f_A = 2410 \div 3150 \text{ MPa}$;
- $\epsilon_{Au} = 1,5 \div 4,4\%$.

1.2.1.4 FIBRE BASALTICHE

Le fibre di basalto appartengono alla categoria delle fibre minerali assieme alle fibre di carbonio e alle fibre di vetro ma, rispetto a queste, hanno migliori proprietà meccaniche e fisiche, oltre che un costo significativamente inferiore rispetto alle prime. Le fibre di basalto hanno tipicamente un diametro tra 9 e 13 μm , sono ottimi isolanti termici e acustici,



mantengono le proprietà meccaniche anche ad alte temperature e sono molto stabili chimicamente (sia in ambiente acido che alcalino).

La composizione chimica della fibra di basalto dipende dalla percentuale con cui le singole rocce sono sciolte in un unico fuso, la purezza della fibra dipende da una serie di fattori, fra cui la maniera con cui viene filata la roccia fusa. Il processo tecnologico per la produzione della fibra di basalto è basato su quattro passaggi fondamentali:

- pretrattamento della roccia;
- fusione in fornace per l'ottenimento delle fibre continue;
- trattamento di filatura in continuo;
- lavorazioni di tessitura per l'ottenimento di rotoli o di forme finali per applicazioni specifiche.

Il grande contenuto di ossido di ferro della roccia basaltica aumenta la temperatura di cristallizzazione e rende la curva della viscosità molto più brusca in confronto a quanto si ha per il vetro; questo aspetto richiede che il forno di fusione fornisca le condizioni richieste per il mantenimento dello stato omogeneo della massa fusa durante le diverse fasi del processo di lavorazione. Un esempio di rotoli di fibre basaltiche è riportato in Figura 1.8.

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

- Resistenza e rigidità elevate;
- T° di utilizzo: $-200^\circ \div +800^\circ\text{C}$;
- Bassa conducibilità termica;
- Altamente isolanti;
- Riciclabile;
- Molto stabile chimicamente;
- $E_b=70\div 150$ GPa;

- $\varepsilon_u = 4,5 \div 8\%$.



Fig. 1.8– Rotoli di fibre basaltiche

1.3 FASE MATRICE

La matrice, consentendo un'efficace aderenza, ripartisce la sollecitazione tra le fibre isolandole dall'azione deteriorante degli agenti chimici.

Le proprietà che la fase matrice deve 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.

Un composito in fase di esercizio può essere soggetto a sollecitazioni taglienti, dirette ortogonalmente al piano, e azioni taglienti interlaminari agenti nel piano del materiale.

In ogni caso la resistenza del composito sarà fornita dalla matrice che 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. 1.9).

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.

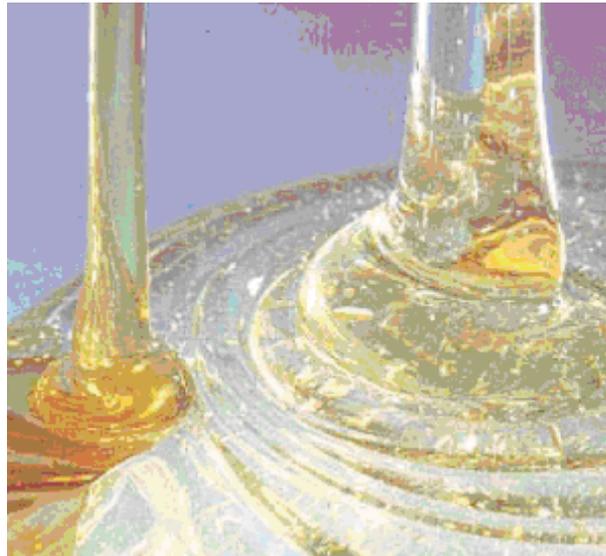


Fig. 1.9 - Matrice

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).

Le matrici più utilizzate per la fabbricazione dei compositi fibrorinforzati sono quelle polimeriche a base di resine termoindurenti. Tali resine sono disponibili in forma parzialmente polimerizzata e si presentano liquide o pastose a temperatura ambiente.

Per miscelazione con un opportuno reagente esse polimerizzano (reticolano) fino a diventare un materiale solido vetroso. Poiché la reazione può essere accelerata agendo sulla temperatura, le suddette resine sono anche dette termoindurenti.



I vantaggi da esse presentati sono diversi, infatti sono caratterizzate da:

- una bassa viscosità allo stato fluido e, quindi, da una relativa facilità di impregnazione delle fibre;
- ottime proprietà adesive;
- possibilità di avere formulazioni che reticolano a temperatura ambiente;
- buona resistenza agli agenti chimici;
- assenza di temperatura di fusione.

I principali svantaggi sono rappresentati, invece, da:

- ampiezza del campo di temperature di esercizio, limitato superiormente dalla temperatura di transizione vetrosa;
- modesta tenacità a frattura (comportamento fragile);
- sensibilità all'umidità in fase di applicazione sulla struttura.

Le resine termoindurenti più utilizzate nei compositi fibrorinforzati per il settore civile sono le epossidiche, ma è possibile impiegare anche resine poliestere o vinilestere.

Le resine **epossidiche** sono una miscela in cui il reagente principale è il prepolimero epossidico (fluido viscoso) a cui viene aggiunto un agente reticolante. Esse presentano una buona resistenza all'umidità ed agli agenti chimici ed, inoltre, esibiscono ottime proprietà adesive; sono perciò particolarmente indicate per la realizzazione di compositi da impiegare nel settore civile.

Le resine **poliestere** o **vinilestere**, pur possedendo, rispettivamente, notevole versatilità e ottime prestazioni ad alte temperature ed in ambienti aggressivi, non sono di solito utilizzate nelle costruzioni civili, presentando solitamente resistenza meccanica e proprietà adesive inferiori, rispetto a quelle epossidiche.

1.4 INTERFASE

Per ottenere un composito ad elevata resistenza è necessario garantire una buona adesione tra matrice ed il rinforzo. Tale adesione è garantita dall'impiego di un componente che viene applicato su uno strato molto sottile della superficie delle fibre in modo da rendere compatibile la matrice organica e la superficie stessa (*sizing*); ciò comporta la presenza di una terza fase intermedia tra la matrice e le fibre, detta "Interfaccia", o interfase, (Fig. 1.10). 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, tuttavia, fondamentali per il successo del sistema complessivo nelle applicazioni strutturali

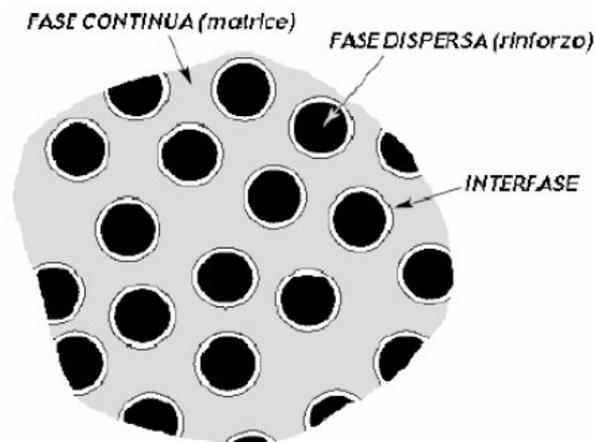


Fig 1.10 – Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito

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 che (Fig. 1.11):

- La rigidità del composito è inferiore rispetto a quella delle fibre;

- La deformazione attinta a rottura è 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).

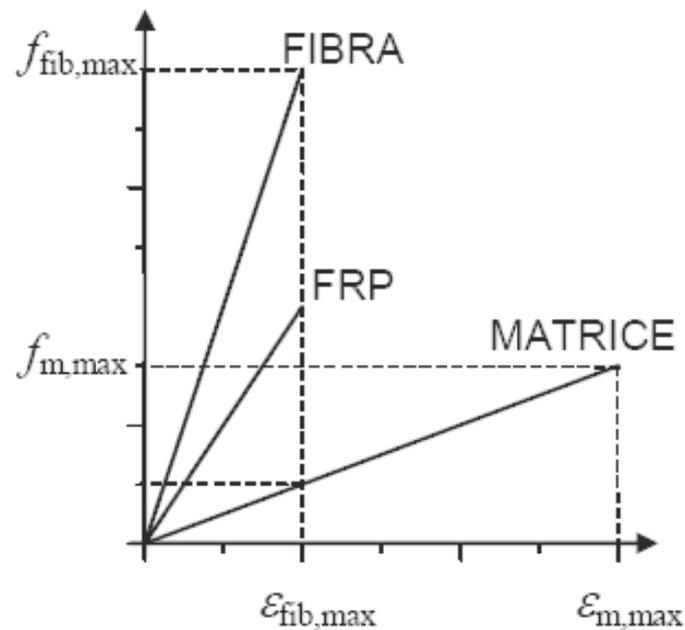


Fig. 1.11 – Legami costitutivi di fibre, matrice e corrispondente composito.

1.5 CARATTERISTICHE DELLE BARRE DI FRP

Le barre di FRP, utilizzate come armatura interna nelle strutture civili, sono per forma simili a quelle di acciaio (Fig. 1.12). Non sono state commercialmente disponibili fino alla fine degli anni settanta, ma hanno avuto il loro più diffuso utilizzo dagli anni novanta. Sono state introdotte sul mercato barre con differenti sezioni rette, ad esempio quadrate, circolari o cave.

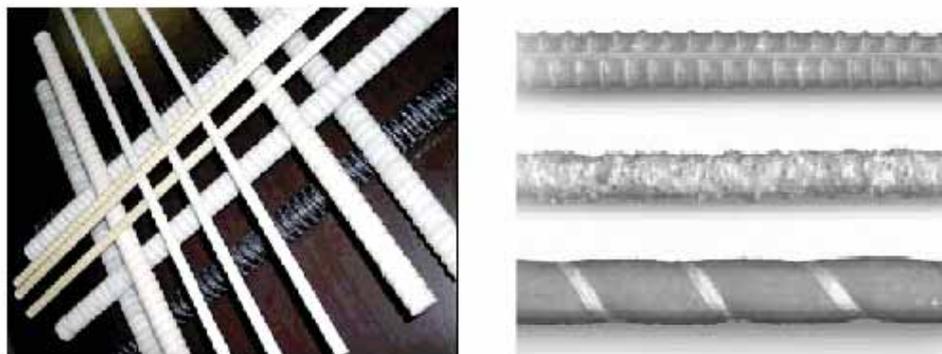


Fig. 1.12 – Tipologie di barre di FRP, a sezione circolare presenti in commercio.

1.5.1 PROPRIETA' FISICHE

1.5.1.1 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 (Tabella 1.2):

Barra	α_l [$10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]	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 1.2 – 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. 1.13).

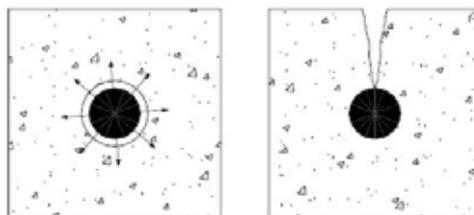


Fig. 1.13 – Fessurazione indotta dalle tensioni circonferenziali

Queste ultime possono inficiare l'aderenza calcestruzzo-FRP con conseguenze indesiderabili sul comportamento strutturale, sia in condizioni di esercizio che in condizioni 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 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.

1.5.1.2 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 alle 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.

1.5.2 COMPORTAMENTO COSTITUTIVO E 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. Le barre di FRP sono



costituite da materiali compositi fibrorinforzati con matrici termoindurenti e caratterizzate da un assetto unidirezionale delle fibre, generalmente, presenti con una frazione volumetrica compresa tra il 50% e il 70%.

1.5.2.1 Legame Costitutivo, confronto FRP-acciaio

Come è evidente osservare dal confronto delle curve caratteristiche tensione/deformazione per barre di FRP e di acciaio (Fig. 1.14), tutte presentano nella prima fase deformativa un comportamento elastico-lineare: 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”; per quanto riguarda l'acciaio, invece, 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 improvvise, 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.

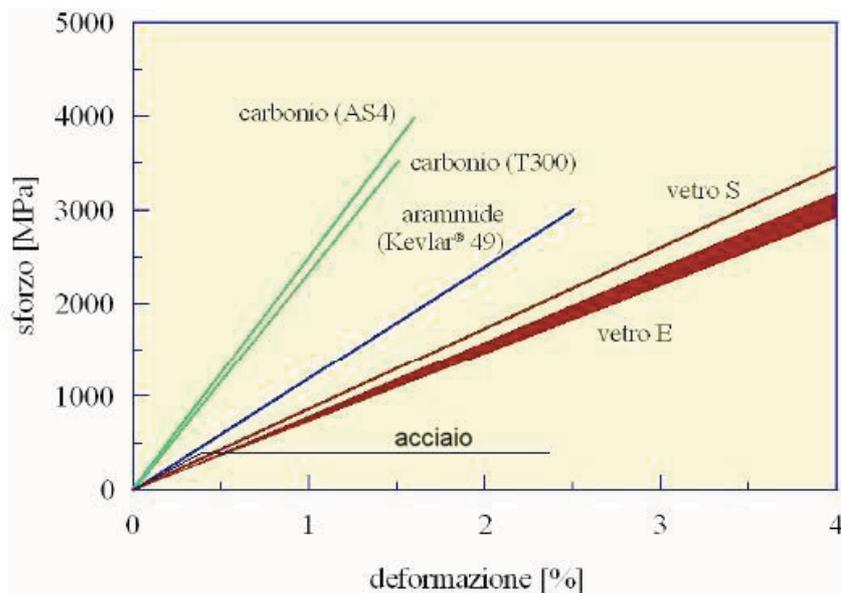


Fig. 1.14 – Legame costitutivo, confronto FRP-acciaio

Come si può notare dalla figura, le caratteristiche di resistenza meccanica delle fibre, e quindi dei FRP, sono molto 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.

1.5.2.2 Resistenza e modulo di elasticità a trazione in direzione longitudinale

Gli approcci disponibili per valutare la resistenza ed il modulo di elasticità a trazione delle barre in direzione longitudinale sono di due tipi: il primo si basa su prove di trazione diretta, il secondo su prove di flessione, eseguite su campioni di barre annegate in travi di calcestruzzo. Sebbene fornisca generalmente valori della resistenza più elevati, la prova di trazione diretta è più agevole e, pertanto, viene preferita sul piano operativo.

Le barre per armature di FRP sono fabbricate con resine termoindurenti, quindi non possono essere piegate in cantiere in quanto, una volta che il materiale è stato trattato, non è più

possibile eseguire delle piegature, dato che non può subire deformazioni plastiche. Elementi curvi e staffe, infatti, devono essere realizzati direttamente in fabbrica. La resistenza a trazione degli elementi curvi, come staffe e ferri piegati, risulta essere inferiore rispetto a quella degli elementi rettilinei. Questa riduzione, dovuta principalmente alla elevata concentrazione di sforzi che si realizza nella porzione curva, porta la resistenza a trazione fino al 40-50% di quella di una barra dritta.

E' possibile determinare sperimentalmente le caratteristiche meccaniche delle barre in materiale composito.

Esistono degli istituti volti alla regolamentazione dei processi di prova dei materiali in ambito comunitario, nazionale (EN-UNI) ed 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.1.15). Da tale prova è possibile ottenere i valori del modulo elastico, E , nonché i valori di tensione e deformazione a rottura del materiale.



Fig. 1.15 – Flat Coupon test



1.5.2.3 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.

1.5.3 PESO SPECIFICO

Le barre di FRP hanno un peso specifico compreso tra 1,25 e 2,1 g/cm³ e risultano, pertanto, sei o quattro volte più leggere dell'acciaio, che ha un peso specifico di 7,9 g/cm³.

Nella tabella 1.3 sono, invece, riportati valori di densità tipici per barre:

Acciaio	GFRP	CFRP	AFRP
7,90	1,25-2,10	1,50-1,60	1,25-1,40

Tabella 1.3 – Valori tipici di densità di barre per armatura interna, g/cm³ (ACI 440.1R-06)

Tale proprietà determina una diminuzione dei costi di trasporto, una minore incidenza del peso proprio sui carichi della struttura ed una più agevole movimentazione dei materiali in cantiere.



1.5.4 INFLUENZA DELLE AZIONI AMBIENTALI E DEI CARICHI DI LUNGA DURATA

Uno degli aspetti più importanti negli elementi in calcestruzzo armato con FRP è l'aderenza tra barra e 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 allo scorrimento, effetto cuneo per attrito, dovuto alle irregolarità (volute) della superficie.

Come detto, l'evidenza sperimentale 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 anche a riduzioni dell'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.

Una delle principali ragioni che hanno portato a considerare le barre di FRP adatte ad essere usate come armatura è costituita dalla loro potenziale durabilità rispetto a quella dell'acciaio. Le principali cause che portano alla degradazione delle barre in composito sono le avverse condizioni ambientali, l'elevata alcalinità, l'esposizione ai raggi UV e l'elevata temperatura. Un'importante causa di rottura per le armature di FRP, come già visto in precedenza, è relativa all'azione di tensioni costanti prolungate nel tempo (*creep*), oppure a condizioni di carico ciclico (fatica), che portano alla riduzione accelerata delle proprietà meccaniche.

1.6 UTILIZZO DI BARRE IN FRP PER USO STRUTTURALE

Come già detto in precedenza, le applicazioni strutturali dei materiali compositi, come armatura di elementi in calcestruzzo cementizio, sono frequenti e diffuse soprattutto



all'estero. Il maggiore incentivo per l'uso di FRP è rappresentato dal fatto che l'azione combinata dell'acqua e dei sali disgelanti, cosparsi sulla pavimentazione dei ponti durante i mesi invernali, favorisce ed accelera la corrosione delle armature di acciaio.

In Asia, alla fine degli anni novanta, il Giappone contava il maggior numero di applicazioni di questo tipo e solo recentemente è stato superato dalla Cina, che è divenuta il paese con il più consistente impiego di barre di FRP come armature sia di solette da ponte che di strutture in sotterraneo.

In Nord America, il Canada è attualmente il paese leader nell'uso di armature in FRP per la costruzione di solette da ponte.

1.6.1 PROCESSI PRODUTTIVI DI BARRE IN 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 (si veda il documento CNR-DT 203/2006) 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.

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.

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.

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.

1.6.2 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.



CAPITOLO II

LINEE GUIDA PER LA CARATTERIZZAZIONE DI BARRE IN FRP

2.1 TIPOLOGIE DI PROVE PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLE BARRE DI FRP UTILIZZATE COME RINFORZO DI STRUTTURE IN CALCESTRUZZO (ACI 440.3R-04)

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 ASHTO. Nella tabella 2.1 sono schematicamente elencati i metodi di test da effettuare su barre utilizzate per il rinforzo del calcestruzzo.



Proprietà	ASTM test method(s)	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 scritto, perché non fornisce informazioni adeguate sulla dimensione del campione 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 di FRP. I lavori in corso da parte del comitato ACI 440 prevedono di produrre metodi di verifica per il legame barra-calcestruzzo nelle travi.
Resistenza a taglio	D 5379	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. La resistenza a taglio è di interesse specifico per le applicazioni dove sono usate barre di FRP per attraversare i giunti delle costruzioni nelle pavimentazioni di calcestruzzo.
	D 3846		
	D 2344		
	D 4475		
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 nelle attrezzature di prova 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	

Tabella 2.1 – 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 nelle barre e nei laminati e sono caratterizzati da 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. Si introducono ora le principali tipologie di test adottate dall'ACI 440.3R-04 per le barre di 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 0,1 mm. 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 100mm, 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 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.

Di seguito sono allegate delle fotografie riguardanti le tipiche modalità di rotture di queste (Fig. 2.1).



Fig. 2.1 – Modalità di rottura di una barra di VTR

B.3 - Metodo di prova 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 del legame di aderenza delle barre di FRP, anche se, in realtà, sono disponibili vari tipi di metodi per la determinazione del valore di tale aderenza.

Per quanto riguarda la preparazione dei campioni, delle barre di FRP devono essere rappresentativi del lotto da testare. Ogni campione deve essere tagliato in tratti di 1200 mm e assemblato con un ancoraggio all'estremità. I campioni di prova devono contenere o una barra di FRP disposta parallelamente alla direzione del getto di calcestruzzo, o due barre di FRP disposte perpendicolarmente al getto di calcestruzzo. Il numero di campioni da testare 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 altro test 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 parallelamente 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 perpendicolarmente alla direzione del getto, i campioni devono essere prismi di cemento di dimensioni 200 x 200 x 400 mm, 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 300 mm 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 il metodo di prova vero e proprio, una volta montato il set up di prova, si misura accuratamente, con l'approssimazione di 0,5mm, 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.

Nelle seguenti figure (Fig. 2.2, Fig 2.3) vengono descritti rispettivamente i test di aderenza a seconda della disposizione della barra, mentre in Fig. 2.4 è schematicamente mostrato l'apparecchio di prova impiegato.

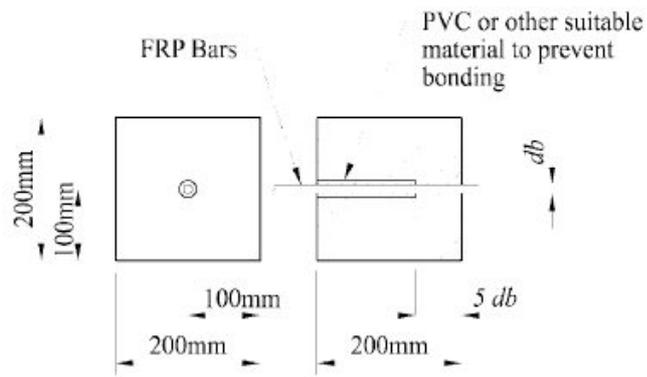


Fig 2.2 - Test di aderenza per la barra disposta verticalmente

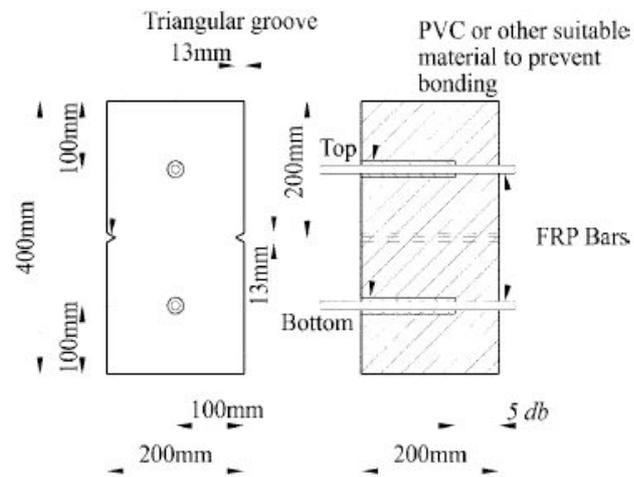


Fig 2.3 - Test di aderenza per le barre disposte orizzontalmente

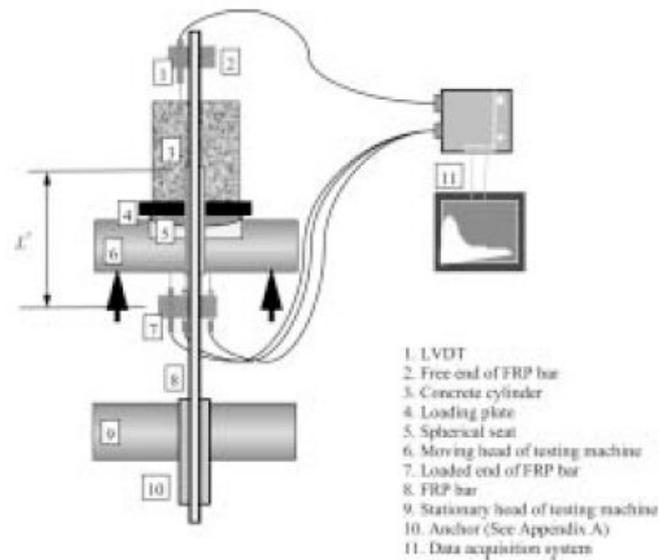


Fig 2.4 - Schema dettagliato dell'apparecchio di prova.

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. L'apparecchio di prova è mostrato in Fig. 2.5.

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 300mm, a prescindere dai diametri delle barre. Il numero di campioni da testate non deve essere inferiore a cinque.

Per quanto riguarda 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 tagliante 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.

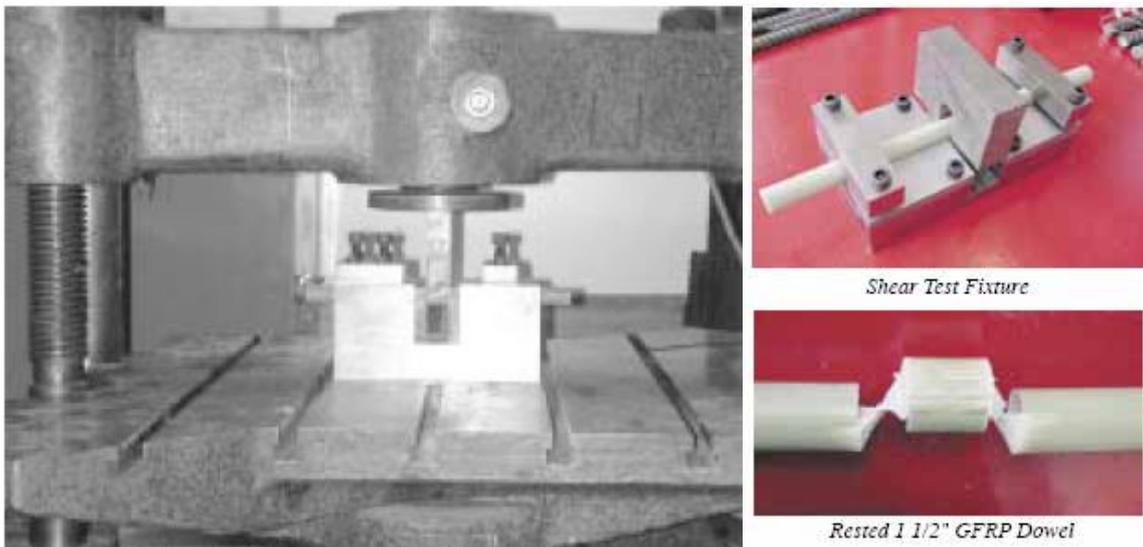


Fig. 2.5 – Apparecchio di prova per la determinazione della resistenza a taglio delle barre

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 Fig. 2.6:

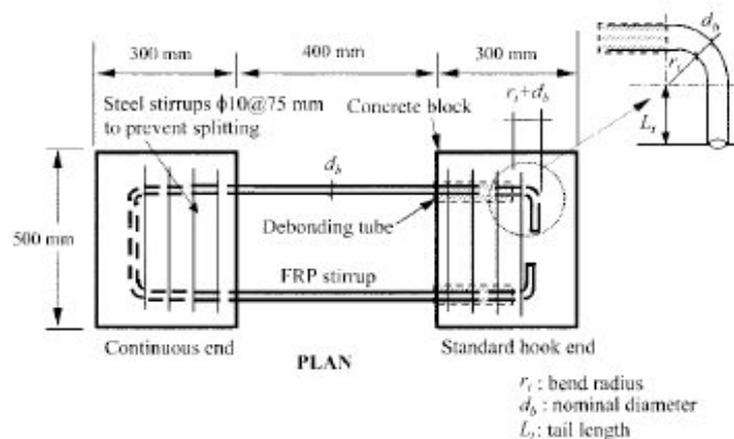


Fig. 2.6 – Configurazione di un campione per la determinazione della resistenza nella piegatura

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 testate 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 vanno in crisi 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. 2.7, 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.

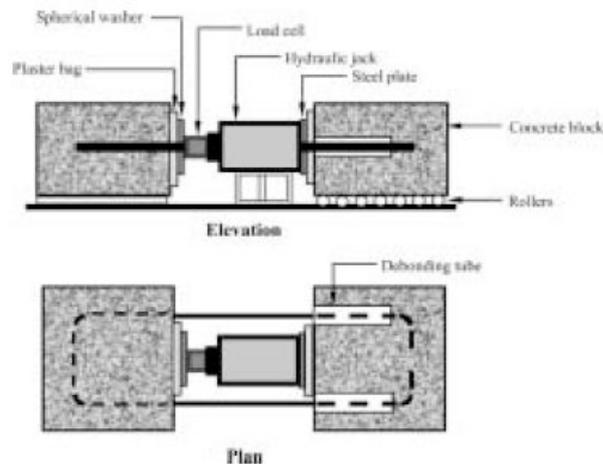


Fig. 2.7 – Apparecchiatura di prova per la determinazione della resistenza nella piegatura

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 (Fig. 2.8), 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.

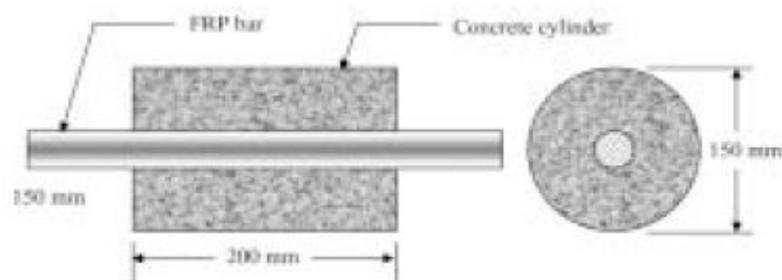


Fig. 2.8 – Dimensioni del cilindro di calcestruzzo

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 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.

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.

2.2 LINEE GUIDA FORNITE DAL CNR-DT203/2006

Il CNR-DT203/2006 tratta l'impiego di barre di FRP come armatura di getti di calcestruzzo cementizio.



Essendo ormai ampiamente diffuso in molti paesi del mondo l'utilizzo di materiali compositi fibrorinforzati in sostituzione dell'acciaio per la realizzazione di elementi strutturali di calcestruzzo, sono state fornite Istruzioni e Linee guida di ausilio nella progettazione, esecuzione e controllo di tali strutture.

La principale differenza che caratterizza tali materiali è il comportamento meccanico dei FRP, il cui legame costitutivo, come mostrato nel paragrafo 1.5.2, è essenzialmente elastico lineare fino a rottura.

Le Istruzioni o Linee Guida attualmente presenti e disponibili in lingua inglese sono riconducibili a cinque documenti:

- ACI 440.1R-03, 2003 edito dall'*American Concrete Institute (ACI)* che consiste in una guida per il progetto e l'esecuzione di operazioni di rinforzo per strutture in calcestruzzo tramite barre in FRP;
- CAN/CSA-S6-00,2000 documento pubblicato in Canada dalla *Canadian Standard Association (CSA) International*, che consiste in un codice per la progettazione di ponti;
- CAN/CSA-S6-02,2002 documento pubblicato in Canada dalla *Canadian Standard Association (CSA) International*, che fornisce istruzioni per la progettazione e l'esecuzione di edifici;
- *fib*,2005, "*FRP Reinforcement for RC Structures*";
- JSCE,1997, document giapponese fornito dalla *Japan Society of Civil Engineers*, che tratta "*Raccomandation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials*".

I suddetti documenti utilizzano tutti il metodo semiprobabilistico agli stati limite per le verifiche di resistenza delle sezioni.



Le ragioni che rendono vantaggioso l'uso di barre di FRP al posto delle usuali barre di acciaio sono molteplici.

I materiali compositi a base di fibre di vetro (GFRP) non sono conduttori; questa proprietà fornisce numerosi vantaggi: qualora questi elementi fossero esposti a correnti vaganti, non subirebbero alcun danno e si eviterebbe anche il fenomeno della corrosione che aggredisce, invece, le usuali armature metalliche. La presenza di correnti vaganti affligge, ad esempio, le strutture a servizio del trasporto su rotaia (linee ferroviarie e metropolitane) a cielo aperto o in galleria. Anche le solette di ponti stradali, utilizzati come cavalcavia ferroviari, possono essere interessate dallo stesso fenomeno. In edilizia, il ricorso alla nuova tecnologia si è dimostrato molto vantaggioso soprattutto per la realizzazione di impalcati di edifici per uso civile o industriale. Le ragioni che in tal caso inducono 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, essere 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.

È importante che l'utilizzatore sia bene informato sui pregi e sui difetti dei materiali compositi fibrorinforzati, allo scopo di usufruire in modo adeguato dei primi e di essere in grado di controllare convenientemente i secondi.



E' di peculiare importanza garantire un'adeguata vita utile delle strutture così progettate e realizzate. Nel prosieguo della descrizione saranno evidenziate le soluzioni progettuali più appropriate per gestire al meglio le necessità strutturali.

Le presenti Istruzioni del CNR sono state redatte sulla base delle attuali conoscenze nel campo dei materiali compositi fibrorinforzati, scaturite anche dai risultati e dall'esperienza acquisite nel corso degli studi teorico-sperimentali relativi ad una serie di progetti di ricerca finanziati in campo nazionale.

Lo scopo delle Istruzioni è fornire un documento di tipo orientativo per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo armato con barre di FRP: l'approccio seguito è quello del metodo semiprobabilistico agli stati limite; l'impostazione adottata è 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. Di conseguenza, è richiesta un'attenzione particolare per le applicazioni e la progettazione in zona sismica, in modo da tenere in 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, solitamente assunto pari a uno in mancanza di adeguate valutazioni.

Sono necessarie, tuttavia, alcune precisazioni:



- Tale documento tratta strutture di calcestruzzo con armatura lenta di FRP, ma non è escluso che alcune membrature di tali strutture presentino un'armatura di tipo tradizionale costituita da barre di acciaio;
- Le istruzioni e le regole contenute in questo documento non possono essere applicate direttamente alle strutture precomprese con cavi di precompressione in FRP, in quanto tali applicazioni necessitano di specifiche verifiche, soprattutto in funzione della tecnica di precompressione applicata, dei sistemi di ancoraggio adoperati e dei criteri di resistenza dei materiali, che risultano sottoposti a stati tensionali elevati a lungo termine;
- Sono necessarie verifiche di resistenza al fuoco degli elementi strutturali, seguendo le indicazioni fornite dalla vigente Normativa antincendio;
- E' consentito l'utilizzo di armature piegate, in accordo con i limiti imposti circa i raggi di curvatura delle piegature.

2.2.1 PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DELLE BARRE

Nell'Appendice B sono riportate le prove di caratterizzazione delle barre di FRP.

2.2.1.1 CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DELLE BARRE IN FRP

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 .

2.2.1.2 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DELLE BARRE IN FRP

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 valutato in accordo con quanto definito al paragrafo precedente.

La forma e le dimensioni dei dispositivi di afferraggio (Fig. 2.9), 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: $l_p - 2 \cdot l_a$.

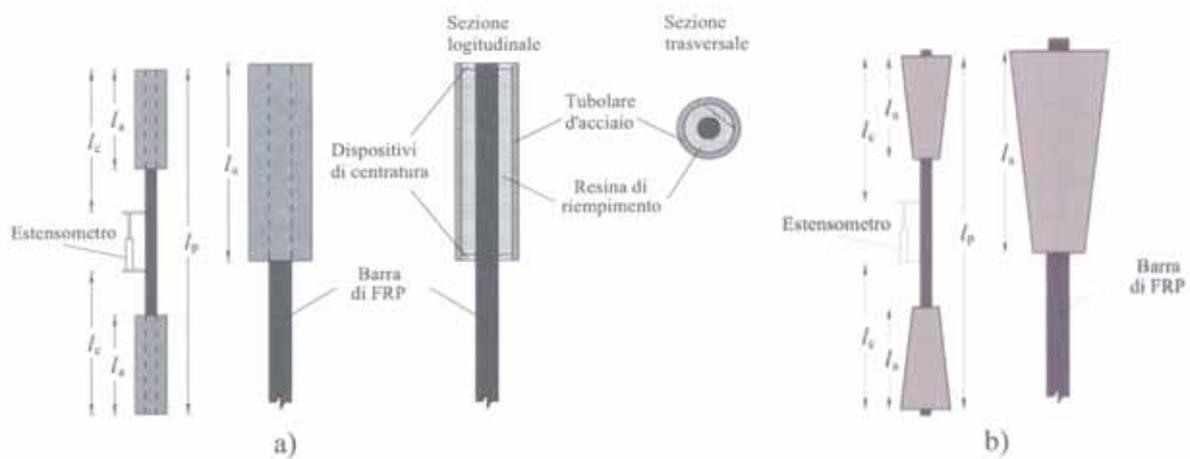


Figura 2.9 –Dispositivi di afferraggio delle barre per test di trazione

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

2.2.1.3 SCHEDA TECNICA PER BARRE IN FRP

Di seguito si esamina, a titolo di esempio, la struttura di una scheda tecnica tipo per le barre di FRP, in accordo con quanto riportato nel documento tecnico CNR-DT200/2006.

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, frattile, 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:

E' riportata una tabella contenente:

- Descrizione delle Proprietà geometriche, quali la geometria della sezione delle barre, l'area ed il perimetro nominale delle barre, il colore, la densità, il contenuto di fibra, la temperatura di transizione vetrosa, temperatura limite massima di utilizzo, conducibilità elettrica, e proprietà fisiche, quali: il modulo di elasticità normale a trazione, la resistenza a trazione, la deformazione a rottura a trazione, la resistenza a *creep*, il rilassamento, l'aderenza (tensione tangenziale);
- Unità di Misura;
- Metodo di Prova impiegato con corrispondente Normativa di riferimento.

Note Importanti:

- 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;
- 3) La ISO 899-1:2003(E) è la Normativa di riferimento generale per la determinazione del comportamento a *creep* 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*");

- 4) 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*";
- 5) 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:

Descrizione

2.3 METODO DI PROVA A TRAZIONE DI BARRE IN FRP IN ACCORDO ALLE ASTM D7205

Il metodo in esame è il D7205/D 7205M chiamato STD- *Standard Test Method (for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars)*.

Vi sono diverse procedure volte alla determinazione delle proprietà di resistenza dei compositi a matrice polimerica; i metodi di prova principali e più diffusi sono: D3039, D3039M e D3916.



Gli elementi lineari utilizzati per il rinforzo di cemento di tipo Portland sono indicati come: barre, armature, aste o tondini a seconda della specifica applicazione. Il metodo di prova in esame è applicabile a tutti i tipi di rinforzo, sempre nel rispetto dei limiti del metodo stesso.

In questo metodo gli elementi di prova sono indicati come barre che, in generale, 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 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 dal sistema di ancoraggio del provino (barra o griglia) alle estremità, si adottano particolari accorgimenti.

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.

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 di ancoraggi, 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.

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 per la misurazione della prova 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, gli ancoraggi, se utilizzati, devono essere progettati in modo tale che la capacità di trazione può essere raggiunta senza che gli stessi possano scivolare per tutta la lunghezza durante il test.

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.

2.3.1 CAMPIONAMENTO E TEST

Vi sono due aspetti di fondamentale importanza per il raggiungimento di risultati soddisfacenti ed affidabili: il campionamento e i provini da testare.

E' necessario che siano soddisfatte le seguenti condizioni:

- Il campionamento richiede almeno 5 provini;
- Per ottenere 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 (Fig. 2.10).

La lunghezza libera tra gli ancoraggi, L, deve essere:

- $L \geq 380\text{mm}$;
- $L \geq 40$ volte il diametro efficace della barra.

L'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 ($23 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$) 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 si differenzia 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.



2.4 LIMITI DIMENSIONALI DELLA STRUMENTAZIONE DI PROVA

La modalità di esecuzione della prova di trazione su barre in GFRP suggerita dall'ASTM D7205 in alcuni casi non è di facile attuazione; in particolar modo, la strumentazione per la realizzazione di tali prove risulta difficile da reperire nel momento in cui le barre sono caratterizzate da un diametro superiore ai 16 mm (mentre in commercio sono diffuse barre in GFRP anche del diametro di 40 mm per l'armatura di opere in sotterraneo, quali: pali di fondazione, *softeyes*, etc). Basti pensare che la più comune macchina universale di prova MTS 810 consente l'esecuzione di prove in trazione, compressione e cicliche su provini di altezza massima pari a 1,4 metri (anche se è disponibile la macchina universale di prova MTS 311 avente la capacità di ospitare provini alti sino a 4.6 m, ma di queste ne esistono poche al mondo).

A titolo di esempio si considera un provino di barra in GFRP caratterizzato da un diametro di 32 mm. Secondo le indicazioni riportate nell'ASTM D7205, la lunghezza di afferraggio della barra per il test di trazione deve essere pari ad 800 mm. Rispettando, inoltre, i limiti imposti alla lunghezza libera tra gli ancoraggi, questa risulterà pari almeno a 40 volte il diametro efficace della barra, quindi 1280 mm.

La lunghezza complessiva dei provini da testare, l_p , sarà pari a:

$$l_p = 40d_b + 2l_a = 1280 + 1600 = 2880 \text{ mm} \approx 3 \text{ m}$$

Molti produttori di barre in GFRP, sono soliti, per tale motivo, non garantire all'interno delle schede tecniche le caratteristiche meccaniche delle barre con diametro superiore ai 32 mm (<http://aslanfrp.com/Aslan100/Resources/Aslan100a.pdf>) specificando che il motivo di ciò è legato alla difficoltà di soddisfare i requisiti (ASTM-D7205) per i campioni da testare.



A tal proposito, al fine di ottenere risultati adeguati e soddisfacenti per la caratterizzazione meccanica delle barre, rispettando i limiti geometrici dei provini suggeriti dall'ASTM 7205, si è pensato di ricorrere ad una strumentazione sostitutiva.

Questa è costituita da un cilindro d'acciaio, al cui interno viene disposta la barra campione per l'intera lunghezza libera da testare e ancorata alle estremità tramite morsetti bullonati (in luogo dei cilindri cavi riempiti con resina termoindurente); questa modalità di prova verrà chiarita in modo esaustivo nel capitolo III.

CAPITOLO III

CONFRONTO TRA TEST DI CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI BARRE IN GFRP ESEGUITI CON LA MACCHINA UNIVERSALE E LA STRUMENTAZIONE PROPOSTA

Al fine di validare la strumentazione di prova proposta, sono stati testati 5 provini di barre in GFRP (numero minimo previsto dalle CNR-DT203/2006) caratterizzati da un diametro pari a 10 mm sia attraverso l'impiego della macchina universale che la strumentazione proposta.

3.1 PROVE A TRAZIONE ESEGUITE CON LA MACCHINA UNIVERSALE

Le prove sperimentali sono state eseguite mediante la macchina universale di prova MTS 810 (Fig. 3.1). La preparazione dei campioni da testare, in accordo alle indicazioni fornite dall'ASTM D7205, prevede per l'afferraggio del campione, due cilindri cavi in acciaio alle estremità del provino al cui interno viene posizionata la barra. E' indispensabile che quest'ultima venga centrata correttamente ed ancorata tramite l'utilizzo di resina termoidurente.



Figura 3.1 –MTS Servo Hydraulic Load Frames

La barra da testare viene in un primo momento centrata nel cilindro cavo grazie all'ausilio di 4 viti, regolate in modo tale da ottenere un perfetto allineamento dell'asse della barra con l'asse del cilindro. Successivamente, il cilindro verrà riempito di resina termoindurente in modo tale da ancorare la barra creando un effetto morsetto (Fig. 3.2).



Figura 3.2 –Predisposizione barra

Nella tabella che segue (Tabella 3.1) sono riassunti i risultati ottenuti dalle prove di caratterizzazione meccanica effettuate tramite l'applicazione di un carico di trazione progressivamente crescente.

Diametro nominale	Provino	$f_{tu,p}$ [MPa]	$\varepsilon_{fu,p}$ [MPa]	E_f [GPa]	Durata [min.]
10-mm	B1	1188,5	0,0226	52	8,5
	B2	1238,9	0,0221	56	8,1
	B3	1145,2	0,0230	50	8,5
	B4	1016,0	0,0230	46	8,3
	B5	1108,9	0,0241	46	8,4

Tabella 3.1 – Risultati delle prove delle barre con diametro 10 mm

Si riportano di seguito alcune immagini rappresentative delle tipiche modalità di rottura delle barre testate (Fig. 3.3, Fig. 3.4).



Figura 3.3 – Tipica modalità di rottura delle barre dal diametro 10mm



Figura 3.4 – Tipica modalità di crisi dei 5 provini testati

3.1 PROVE A TRAZIONE ESEGUITE CON LA STRUMENTAZIONE PROPOSTA

La preparazione dei campioni da testare, in accordo alle indicazioni fornite dall'ASTM D7205, prevede la disposizione di dispositivi di afferraggio alle estremità del campione da testare al cui scopo sono raccomandati dall'ASTM D7205 dei tubolari di acciaio al cui interno viene disposta la barra successivamente fissata attraverso resina epossidica.

La strumentazione di prova proposta prevede l'impiego di un cilindro d'acciaio, al cui interno viene disposta la barra campione da testare (Fig. 3.5).



Figura 3.5 –Set-up impiegato per test di trazione

La barra è bloccata alle estremità tramite l'utilizzo di morsetti. La barra viene sollecitata grazie al posizionamento, alla destra del cilindro di acciaio, di un pistone, messo in azione da un martinetto idraulico. Per misurare la forza applicata, invece, è presente una cella di carico alla sinistra del cilindro d'acciaio.

Al fine di effettuare correttamente la prova, è necessario svolgere le seguenti operazioni:

- 1) Posizionamento cella di carico: la cella di carico viene posizionata sul lato sinistro del tubo di acciaio, essa ha il compito di stimare il carico applicato e, in particolar modo, il carico di rottura (Fig. 3.6)



Figura 3.6 –Posizionamento cella di carico.

- 2) Inserimento barra: si inserisce all'interno del cilindro d'acciaio la barra di GFRP del diametro da testare. Prima di inserire la barra all'interno del cilindro è necessario incollare una coppia di bulloni (rappresentativi della base di lettura dell'LVDT), ad una prefissata distanza di interesse (non inferiore ad 8 volte il diametro della barra come suggerito da ASTM 7205) tramite un'apposita resina che si indurisce sotto l'azione di raggi UV prodotti con apposita lampada. Ai bulloni verranno, poi, avvitati dei perni fissati ai basamenti che sostengono lo strumento di misura degli spostamenti, ovvero l'LVDT (Fig. 3.7).



Figura 3.7 –Predisposizione base di lettura LVDT.

- 3) Posizionamento morsetti: si inserisce, dunque, la barra all'interno del cilindro e si posizionano i morsetti alle estremità della barra, serrando gli stessi tramite bullonatura (Fig. 3.8, Fig. 3.9).



Figura 3.8 –Serraggio della barra



Figura 3.9 –Particolare serraggio barra

- 4) Inserimento LVDT: si bloccano i perni ai due basamenti dove va inserito lo strumento LVDT come in Fig. 3.10



Figura 3.10 –Predisposizione basamento ospitante LVDT

Dopo aver eseguito in successione le operazioni precedentemente elencate si procede alla prova di trazione vera e propria.

I dati relativi alle prove eseguite sui 5 campioni sono riportati nella seguente tabella (Tabella 3.2):

Diametro nominale	Provino	$f_{fu,p}$ [MPa]	$\epsilon_{fu,p}$ [MPa]	E_f [GPa]	Durata [min.]
10-mm	10-VTR-01	1221	0,0230	53	4,02
	10-VTR-02	1251	0,0241	52	9,46
	10-VTR-03	1139	0,0247	46	3,69
	10-VTR-04	1069	0,0232	46	4,92
	10-VTR-05	1107	0,0226	49	4,89

Tabella 3.2 – Risultati delle prove delle barre con diametro 10 mm sulla base del diametro nominale

3.2 APPLICAZIONE DELL'ANOVA TEST PER DIFFERENTI TIPOLOGIE DI PROVE DI CARATTERIZZAZIONE MECCANICA.

Al fine di valutare la validità della procedura di prova proposta, è stata eseguita un'ANOVA test tra i risultati sperimentali dei 5 campioni testati attraverso le due procedure sopra menzionate.



L'analisi della varianza, nota con l'acronimo ANOVA (*ANalysis Of Variance*), è un insieme di tecniche statistiche che permettono di comparare due o più gruppi di dati confrontando la variabilità interna a questi gruppi con la variabilità tra i gruppi.

Essa è utilizzata per testare le differenze fra medie campionarie, a tal fine vengono prese in considerazione le rispettive varianze. Il principio alla base di questo test è quello di stabilire se due o più medie campionarie possano derivare da popolazioni caratterizzate da stessa media parametrica.

Facendo riferimento al caso in esame, l'ANOVA test è stato eseguito tre volte, dapprima basandosi sui valori di resistenza a trazione, successivamente richiamando i valori del modulo elastico ed infine considerando la deformazione ultima delle barre.

Sono stati sottoposti all'analisi della varianza due gruppi, costituiti ognuno da 5 campioni.

Nel primo test per ogni campione viene riportato il valore di resistenza a trazione che lo caratterizza, nelle tabelle che seguono (Tabella 3.3, Tabella 3.4), oltre ad esso, vengono mostrati i valori di:

- Media;
- Deviazione Standard;
- Varianza;
- Coefficiente di variazione.

Specimen Number	Specimen ID	f_u [MPa]	Media	Deviazione standard	Varianza	CV
#1	B1	1189	1140	84	7126	7,4%
#2	B2	1239				
#3	B3	1145				
#4	B4	1016				
#5	B5	1109				

Tabella 3.3 – Dati relativi al primo gruppo costituito da barre con diametro 10mm riferendosi ai valori di resistenza a trazione .



Specimen Number	Specimen ID	f_{tu} [MPa]	Media	Deviazione standard	Varianza	CV
#1	10-VTR-01	1221	1157	76,65	5875	6,6%
#2	10-VTR-02	1251				
#3	10-VTR-03	1139				
#4	10-VTR-04	1069				
#5	10-VTR-05	1107				

Tabella 3.4 – Dati relativi al secondo gruppo costituito da barre con diametro 10mm riferendosi ai valori di resistenza a trazione .

Per eseguire in maniera corretta l'analisi della varianza è necessario assumere che:

- Ciascun gruppo è un campione casuale indipendente;
- Ciascun gruppo è un campione casuale prelevato da una popolazione normale;
- I gruppi devono provenire da popolazioni con varianze uguali.

La procedura per l'esecuzione dell'analisi ANOVA ad un fattore prevede innanzitutto la definizione delle possibili ipotesi:

- H_0 = non esistono differenze fra le popolazioni osservate, le differenze osservate sono dovute al caso;
- H_1 = le differenze osservate rispecchiano differenze reali tra le popolazioni.

Secondo l'analisi della varianza ogni singola osservazione x_{ij} è la somma delle seguenti aliquote:

$$x_{ij} = \mu + \alpha_j + \varepsilon_{ij} \quad (i=1 \dots n; j=1 \dots m)$$

- μ è la media generale;
- α_j è un fattore dovuto all'effetto del trattamento j-simo, misurato come differenza fra media del trattamento e media generale:

$$\alpha_j = \mu_j - \mu;$$



- ε_{ij} è un fattore casuale detto residuo o errore sperimentale, ovvero un fattore sconosciuto non valutato o non controllato nell'esperimento. Gli errori ε_{ij} devono essere fra loro indipendenti, dare varianze omogenee ed essere distribuiti normalmente.

La metodologia di ANOVA prevede il calcolo della devianza totale che è scomposta in:

- Devianza fra i trattamenti (*between*) con i suoi gradi di libertà e varianza relativa;
- Devianza entro i trattamenti (*within*) con i suoi gradi di libertà e la varianza relativa.

La devianza totale (o SQ, Somma dei Quadrati degli scarti, o *Sum of Squares*):

$$SQ_{tot} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\bar{x}_{ij} - \bar{x})^2$$

La devianza tra i trattamenti:

$$SQ_{tra} = m \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - \bar{x})^2$$

La devianza entro i trattamenti:

$$SQ_{entro} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_i)^2$$

Dividendo successivamente la devianza tra i trattamenti e la devianza entro i trattamenti per i rispettivi gradi di libertà si ottengono le rispettive varianze.

E' possibile determinare i gradi di libertà della devianza tra i gruppi (*between*) tramite la relazione $df_{between}=(n-1)$, con n il numero dei gruppi, nel caso in esame $n=2$.

Si avrà, dunque:

$$df_{between} = (n-1) = 1$$



Il passo successivo prevede il calcolo dei gradi di libertà della devianza interna ai gruppi (*within*) tramite la relazione $df_{within}=n(m-1)$, con m il numero dei dati all'interno di ciascun gruppo, nel caso in esame $m=5$. Si avrà:

$$df_{within} = n(m-1) = 8$$

La varianza tra i gruppi misura le differenze esistenti tra un gruppo e un altro; la varianza entro i gruppi misura la variabilità esistente attorno alla media aritmetica di ogni gruppo. Entrambi i tipi di varianza dipendono dalla variabilità esistente nei dati ed essendo due misure della stessa variabilità dovrebbero avere lo stesso valore. L'indice dell'uguaglianza tra queste due componenti di varianza è il test F di Fisher fondato sul rapporto:

$$F = \text{Varianza tra} / \text{Varianza entro}$$

Se l'ipotesi H_0 è vera dovrebbe risultare $F=1$. Se, invece, l'ipotesi H_1 è vera dovrebbe risultare $F > 1$.

Successivamente si passa alla determinazione della devianza tra i trattamenti (*Sum of Squares between*) calcolata come il prodotto di m per la somma dei quadrati delle differenze tra la media di ciascun gruppo e la media tra tutte le medie dei gruppi:

$$SSB = SQ_{tra} = m \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - \bar{x})^2 = 801$$

Allo stesso modo si calcola la devianza entro i trattamenti (*Sum of Square Within*) come:

$$SSW = SQ_{entro} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\bar{x}_{ij} - x_i)^2 = 52002$$

La devianza totale sarà data dalla somma di queste due aliquote:

$$SST = SSB + SSW = 52803.$$

Andando a dividere SSB ed SSW per i rispettivi gradi di libertà si giungerà alla determinazione di:



- $MSB(\text{Mean Square Between})=SSB/ df_{\text{between}}=801$;
- $MSW(\text{Mean Square Within})=SSW/ df_{\text{within}}=6500$.

E' possibile ora passare alla determinazione dell'indice F ottenuto come rapporto:

$$F=MSB/MSW=0,12$$

Il valore di significatività, ovvero la probabilità che tali risultati siano attendibili, detto anche F-value risulta essere pari a circa il 74%.

Nella seguente tabella (Tabella 3.5) vengono mostrati nuovamente i risultati fin'ora ottenuti:

SSb	SSw	TOTAL	dfbetween	dfwithin	MSb	MSw	F	F-value
801	52002	52803	1	8	801	6500	0,12	73,5%

Tabella 3.5 – Procedura primo test ANOVA.

Il valore di F critico, che dovrà risultare superiore ad F, è stato ricavato dai valori riportati nella tabella relativa al 95° percentile della pdf di Fisher in corrispondenza dei gradi di libertà $v_1=1$ e $v_2=8$.

$$F\text{-crit}=5,32$$

Di seguito è riportata una tabella riassuntiva (Tabella 3.6):

ANALISI VARIANZA						
Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Tra gruppi	801	1	801	0,12	0,735	5,32
In gruppi	52002	8	6500			
Totale	52803		7301			

Tabella 3.6 – Tabella riassuntiva primo test ANOVA

L'analisi della varianza è stata ripetuta facendo riferimento ai valori del modulo elastico ottenuti in ogni prova. In modo analogo è stata applicata la stessa procedura ed i risultati ottenuti sono i seguenti (Tabella 3.7, Tabella 3.8):



Specimen Number	Specimen ID	E[GPa]	Media	Deviazione standard	Varianza	CV
#1	B1	52	50	4,2	18	8,5%
#2	B2	56				
#3	B3	50				
#4	B4	46				
#5	B5	46				

Tabella 3.7 – Dati relativi al primo gruppo costituito da barre con diametro 10 mm riferendosi ai valori di modulo elastico

Specimen Number	Specimen ID	E[GPa]	Media	Deviazione standard	Varianza	CV
#1	10-VTR-01	53	49	3,3	10,7	6,6%
#2	10-VTR-02	52				
#3	10-VTR-03	46				
#4	10-VTR-04	46				
#5	10-VTR-05	49				

Tabella 3.8 – Dati relativi al secondo gruppo costituito da barre con diametro 10 mm riferendosi ai valori di modulo elastico

SSb	SSw	TOTAL	dfbetween	dfwithin	MSb	MSw	F	F-value
2	115	116	1	8	2	14	0,11	74,7%

Tabella 3.9 – Procedura secondo test ANOVA

Anche in questo caso, come mostra la tabella riassuntiva (Tabella 3.9), il valore di F risulta essere inferiore all’F-critico, in quanto:

$$F\text{-critico}=5,32.$$

L’analisi della varianza è stata ripetuta facendo riferimento ai valori di deformazione ultima delle barre ottenuti in ogni prova.

In modo analogo è stata applicata la stessa procedura ed i risultati ottenuti sono i seguenti (Tabella 3.10, Tabella 3.11):



Specimen Number	Specimen ID	ϵ_{ru} [%]	Media	Deviazione standard	Varianza	CV
#1	B1	0,0226	0,0230	0,00074	5,43E-07	3,2%
#2	B2	0,0221				
#3	B3	0,0230				
#4	B4	0,0230				
#5	B5	0,0241				

Tabella 3.10 – Dati relativi al primo gruppo costituito da barre con diametro 10 mm riferendosi ai valori di deformazione ultima

Specimen Number	Specimen ID	ϵ_{ru} [%]	Media	Deviazione standard	Varianza	CV
#1	10-VTR-01	0,0230	0,0235	0,0009	7,37E-07	3,7%
#2	10-VTR-02	0,0241				
#3	10-VTR-03	0,0247				
#4	10-VTR-04	0,0232				
#5	10-VTR-05	0,0226				

Tabella 3.11 – Dati relativi al secondo gruppo costituito da barre con diametro 10 mm riferendosi ai valori di deformazione ultima

SSb	SSw	TOTAL	dfbetween	dfwithin	MSb	MSw	F	F-value
7,84E-07	5,12E-06	5,9E-06	1	8	0,000001	0,000001	1,2	30,1

Tabella 3.12 – Procedura terza test ANOVA

Anche in questo caso, come mostra la tabella riassuntiva (Tabella 3.12), il valore di F risulta essere inferiore all’F-critico, in quanto:

F-critico=5,32.

I risultati ottenuti dimostrano che la strumentazione proposta per la caratterizzazione meccanica delle barre è valida, in quanto, confrontando le due differenti popolazioni relative



ai dati sperimentali dei test eseguiti con le due differenti strumentazioni di prova, risulta chiaro che non esistono differenze fra le popolazioni osservate.

E' stato, dunque, possibile applicare la strumentazione proposta al fine di caratterizzare meccanicamente gruppi di barre in GFRP di differente diametro, impiegando la strumentazione proposta come descritto nel seguente capitolo.



CAPITOLO IV

PROVE SPERIMENTALI EFFETTUATE SU BARRE IN GFRP ATTRAVERSO LA STRUMENTAZIONE PROPOSTA

Verranno di seguito descritte prove di caratterizzazione meccanica effettuate su barre in GFRP eseguite presso i laboratori della società ATP srl con sede ad Angri (SA) attraverso l'ausilio della strumentazione proposta. La ATP è una società privata che opera nel settore dei compositi dal 1968, che si occupa della produzione di compositi pultrusi in fibra di vetro e carbonio.

4.1 CALCOLO DEL DIAMETRO EQUIVALENTE DELLE BARRE

Successivamente, si passa al calcolo del diametro equivalente della barra; per comprendere il significato tecnico e il suo ruolo si riporta un esempio, ipotizzando di trattare barre in GFRP caratterizzate da un diametro di 8 mm, ricordando che tale calcolo è stato effettuato anche per barre caratterizzate rispettivamente da un diametro di 10 mm e 14 mm. Nella produzione di barre non è possibile raggiungere massima precisione, infatti, industrialmente la barra prodotta non avrà mai un diametro esatto di 8 mm, ma ci saranno delle tolleranze di realizzazione legate al processo produttivo.

Il calcolo del diametro reale si sviluppa tramite le seguenti operazioni:

- 1) Si esamina la barra di riferimento, tenendo conto che la lunghezza standard di normativa è pari a 200 mm; con l'ausilio del calibro si misura la lunghezza effettiva (Fig. 4.1), tale misurazione è necessaria per avere un dato reale e confrontarlo al dato standard, in quanto il taglio meccanico potrebbe indurre scostamenti reali rispetto al dato teorico.



Figura 4.1 –Stima della lunghezza del campione della barra.

- 2) Si inseriscono all'interno di un tubo di vetro graduato 400 ml d'acqua (Fig. 4.2), quantitativo standard definito dalla normativa, che rappresenta il volume di riferimento iniziale;



Figura 4.2 – Tubo di vetro graduato impiegato per la stima del diametro equivalente

- 3) Si inserisce il campione di barra all'interno del tubo di vetro (Fig. 4.3), si osserverà una variazione del volume e, quindi, si avrà una misura del volume finale; la differenza fra volume finale ed iniziale corrisponderà al volume del campione di barra inserita nel tubo, che viene definito volume dello spezzone;



Figura 4.3 – Immersione di barra nel tubo di vetro impiegato per determinazione di 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:

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

4.2 RISULTATI DELLE PROVE A TRAZIONE ESEGUITE SU BARRE DI DIFFERENTE DIAMETRO

Si riportano successivamente alcune immagini rappresentative delle tipiche modalità di rottura delle barre testate (Fig. 4.4, Fig. 4.5, Fig. 4.6).

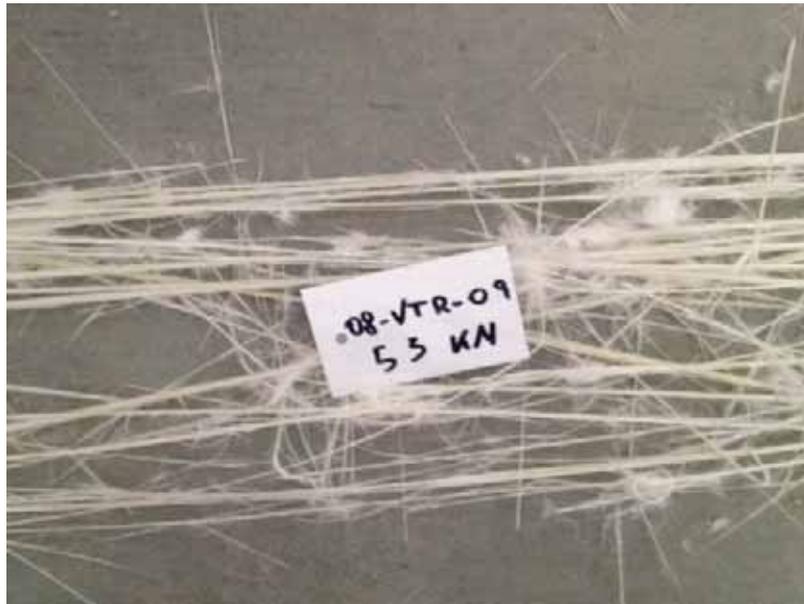


Figura 4.4-Tipica modalità di crisi delle barre del diametro 8mm.

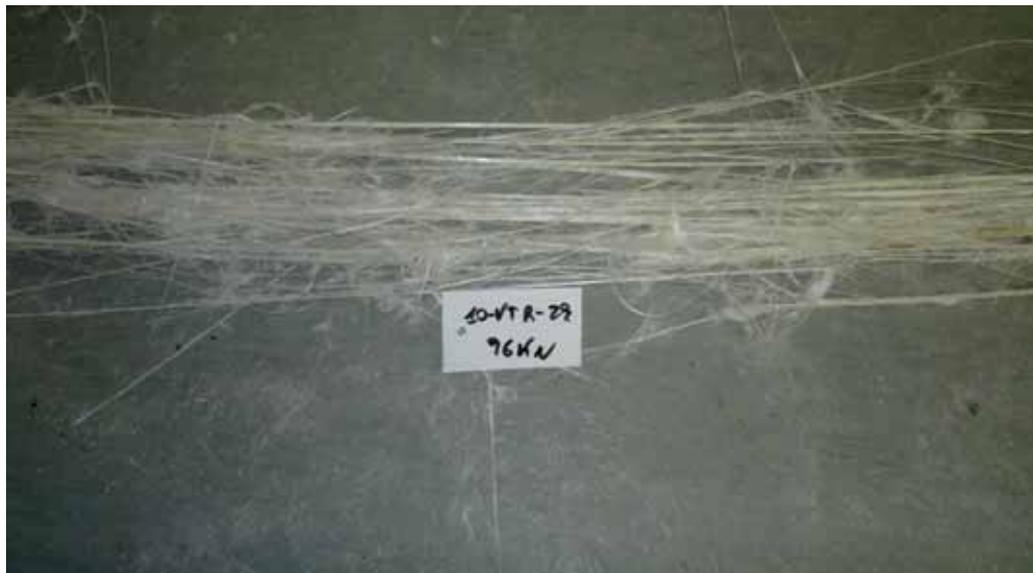


Figura 4.5-Tipica modalità di crisi delle barre del diametro 10mm.



Figura 4.6-Tipica modalità di crisi delle barre del diametro 14mm.

La caratterizzazione meccanica delle barre in GFRP è eseguita in accordo alle linee guida CNR-DT 203/2006 in funzione del diametro nominale (o standard) e del diametro equivalente, d_b . Nelle seguenti tabelle (Tabella 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6) vengono riportati i risultati ottenuti dalle prove su barre di differente diametro. Per ogni tipologia di diametro i risultati sono riportati sia sulla base del diametro nominale che sulla base del diametro equivalente.



Diametro nominale	Provino	d_b [mm]	$f_{tu,p}$ [MPa]	$\epsilon_{fu,p}$ [MPa]	f_1 [MPa]	f_2 [MPa]	ϵ_1 [-]	ϵ_2 [-]	E_f [GPa]	Durata [min.]
8-mm	8-VTR-01	8	1084	0.0246	542	217	0.0123	0.0049	44	3.37
	8-VTR-02	8	1168	0.0272	584	234	0.0136	0.0054	43	3.69
	8-VTR-03	8	1129	0.0275	565	226	0.0138	0.0055	41	4.61
	8-VTR-04	8	1129	0.0269	565	226	0.0134	0.0054	42	4.61
	8-VTR-05	8	1062	0.0253	531	212	0.0126	0.0051	42	3.28
	8-VTR-06	8	1080	0.0204	540	216	0.0102	0.0041	53	3.36
	8-VTR-07	8	1093	0.0238	547	219	0.0119	0.0048	46	3.59
	8-VTR-08	8	1070	0.0210	535	214	0.0105	0.0042	51	3.70
	8-VTR-09	8	1052	0.0210	526	210	0.0105	0.0042	50	2.94
	8-VTR-10	8	1214	0.0264	607	243	0.0132	0.0053	46	2.94
	8-VTR-11	8	1105	0.0235	553	221	0.0118	0.0047	47	2.57
	8-VTR-12	8	1228	0.0256	614	246	0.0128	0.0051	48	2.98
	8-VTR-13	8	1181	0.0227	591	236	0.0114	0.0045	52	2.98
	8-VTR-14	8	1089	0.0253	545	218	0.0127	0.0051	43	4.00
	8-VTR-15	8	1142	0.0254	571	228	0.0127	0.0051	45	3.52
	8-VTR-16	8	1069	0.0191	535	214	0.0095	0.0038	56	3.08
	8-VTR-17	8	1047	0.0184	524	209	0.0092	0.0037	57	2.99
	8-VTR-18	8	1065	0.0184	533	213	0.0092	0.0037	58	3.24
	8-VTR-19	8	1013	0.0236	507	203	0.0118	0.0047	43	2.29
	8-VTR-20	8	1351	0.0255	676	270	0.0127	0.0051	53	3.37

Tabella 4.1 – Risultati delle prove delle barre con diametro 8 mm sulla base del diametro nominale

Diametro equivalente	Provino	d_b [mm]	$f_{tu,p}$ [MPa]	$\epsilon_{fu,p}$ [MPa]	f_1 [MPa]	f_2 [MPa]	ϵ_1 [-]	ϵ_2 [-]	E_f [GPa]	Durata [min.]
8.07-mm	8-VTR-01	7.99	1087	0.0247	544	217	0.0124	0.0049	44	3.37
	8-VTR-02	7.98	1174	0.0273	587	235	0.0137	0.0055	43	3.69
	8-VTR-03	8.02	1124	0.0281	562	225	0.0141	0.0056	40	4.61
	8-VTR-04	7.99	1132	0.0270	566	226	0.0135	0.0054	42	4.61
	8-VTR-05	8.19	1013	0.0253	507	203	0.0127	0.0051	40	3.28
	8-VTR-06	7.99	1082	0.0204	541	216	0.0102	0.0041	53	3.36
	8-VTR-07	8.20	1040	0.0242	520	208	0.0121	0.0048	43	3.59
	8-VTR-08	7.79	1128	0.0213	564	226	0.0106	0.0043	53	3.70
	8-VTR-09	7.90	1079	0.0212	540	216	0.0106	0.0042	51	2.94
	8-VTR-10	7.89	1248	0.0266	624	250	0.0133	0.0053	47	2.94
	8-VTR-11	7.80	1165	0.0238	583	233	0.0119	0.0048	49	2.57
	8-VTR-12	8.37	1122	0.0261	561	224	0.0130	0.0052	43	2.98
	8-VTR-13	8.39	1074	0.0229	537	215	0.0114	0.0046	47	2.98
	8-VTR-14	7.56	1220	0.0254	610	244	0.0127	0.0051	48	4.00
	8-VTR-15	8.39	1087	0.0253	544	217	0.0126	0.0051	43	3.52
	8-VTR-16	8.32	998	0.0192	499	200	0.0096	0.0038	52	3.08
	8-VTR-17	8.26	982	0.0185	491	196	0.0093	0.0037	53	2.99
	8-VTR-18	8.39	968	0.0183	484	194	0.0091	0.0037	53	3.24
	8-VTR-19	8.00	1096	0.0249	548	219	0.0125	0.0050	44	2.29
	8-VTR-20	7.99	1351	0.0255	676	270	0.0127	0.0051	53	3.37

Tabella 4.2 – Risultati delle prove delle barre con diametro 8 mm sulla base del diametro equivalente



Diametro nominale	Provino	d_b [mm]	$f_{fu,p}$ [MPa]	$\epsilon_{fu,p}$ [MPa]	f_1 [MPa]	f_2 [MPa]	ϵ_1 [-]	ϵ_2 [-]	E_f [GPa]	Durata [min.]
10-mm	10-VTR-01	10	1111	0.0214	556	222	0.0107	0.0043	52	4.36
	10-VTR-02	10	1160	0.0302	680	272	0.0151	0.0060	45	5.29
	10-VTR-03	10	1190	0.0262	695	278	0.0131	0.0052	53	6.58
	10-VTR-04	10	1210	0.0320	705	282	0.0160	0.0064	44	5.24
	10-VTR-05	10	1140	0.0312	670	268	0.0156	0.0062	43	5.49
	10-VTR-06	10	1082	0.0233	640	256	0.0116	0.0047	55	6.10
	10-VTR-07	10	1069	0.0232	535	214	0.0116	0.0046	46	4.92
	10-VTR-08	10	1158	0.0243	679	272	0.0121	0.0049	56	5.21
	10-VTR-09	10	1274	0.0263	637	255	0.0131	0.0053	48	6.38
	10-VTR-10	10	1153	0.0260	677	271	0.0130	0.0052	52	5.19
	10-VTR-11	10	1238	0.0293	719	288	0.0147	0.0059	49	5.21
	10-VTR-12	10	1273	0.0223	637	255	0.0112	0.0045	57	5.01
	10-VTR-13	10	1218	0.0316	695	278	0.0158	0.0063	44	5.50
	10-VTR-14	10	1251	0.0241	626	250	0.0120	0.0048	52	9.46
	10-VTR-15	10	1107	0.0226	554	221	0.0113	0.0045	49	4.89
	10-VTR-16	10	1092	0.0228	546	218	0.0114	0.0046	48	3.76
	10-VTR-17	10	1139	0.0247	570	228	0.0123	0.0049	46	3.69
	10-VTR-18	10	1025	0.0187	513	205	0.0094	0.0037	55	4.29
	10-VTR-19	10	1096	0.0224	548	219	0.0112	0.0045	49	4.03
	10-VTR-20	10	1221	0.0230	611	244	0.0115	0.0046	53	4.02

Tabella 4.3 – Risultati delle prove delle barre con diametro 10 mm sulla base del diametro nominale

Diametro equivalente	Provino	d_b [mm]	$f_{fu,p}$ [MPa]	$\epsilon_{fu,p}$ [MPa]	f_1 [MPa]	f_2 [MPa]	ϵ_1 [-]	ϵ_2 [-]	E_f [GPa]	Durata [min.]
10.11-mm	10-VTR-01	10.10	1089	0.0214	545	218	0.0107	0.0043	51	4.36
	10-VTR-02	10.10	1137	0.0296	666	266	0.0148	0.0059	45	5.29
	10-VTR-03	10.26	1130	0.0264	660	264	0.0132	0.0053	50	6.58
	10-VTR-04	9.44	1249	0.0316	791	316	0.0158	0.0063	50	5.24
	10-VTR-05	10.09	1120	0.0306	658	263	0.0153	0.0061	43	5.49
	10-VTR-06	10.11	1058	0.0232	627	251	0.0116	0.0046	54	6.10
	10-VTR-07	10.23	1021	0.0232	511	204	0.0116	0.0046	44	4.92
	10-VTR-08	9.99	1158	0.0243	681	272	0.0122	0.0049	56	5.21
	10-VTR-09	10.32	1196	0.0260	598	239	0.0130	0.0052	46	6.38
	10-VTR-10	10.10	1130	0.0260	664	265	0.0130	0.0052	51	5.19
	10-VTR-11	9.95	1251	0.0290	726	290	0.0145	0.0058	50	5.21
	10-VTR-12	10.26	1209	0.0224	605	242	0.0112	0.0045	54	5.01
	10-VTR-13	10.11	1191	0.0316	680	272	0.0158	0.0063	43	5.50
	10-VTR-14	10.05	1238	0.0243	619	248	0.0121	0.0049	51	9.46
	10-VTR-15	10.10	1085	0.0226	543	217	0.0113	0.0045	48	4.89
	10-VTR-16	10.11	1068	0.0227	534	214	0.0114	0.0045	47	3.76
	10-VTR-17	10.15	1105	0.0246	553	221	0.0123	0.0049	45	3.69
	10-VTR-18	10.46	937	0.0184	469	187	0.0092	0.0037	51	4.29
	10-VTR-19	10.07	1080	0.0225	540	216	0.0113	0.0045	48	4.03
	10-VTR-20	10.10	1197	0.0230	599	239	0.0115	0.0046	52	4.02

Tabella 4.4 – Risultati delle prove delle barre con diametro 10 mm sulla base del diametro equivalente



Diametro nominale	Provino	d_b [mm]	$f_{fu,p}$ [MPa]	$\epsilon_{fu,p}$ [MPa]	f_1 [MPa]	f_2 [MPa]	ϵ_1 [-]	ϵ_2 [-]	E_f [GPa]	Durata [min.]
14-mm	14-VTR-01	14	985	0.0189	493	197	0.0095	0.0038	52	4.94
	14-VTR-02	14	1048	0.0184	524	210	0.0092	0.0037	57	6.87
	14-VTR-03	14	1035	0.0211	518	207	0.0106	0.0042	49	4.49
	14-VTR-04	14	1095	0.0192	548	219	0.0096	0.0038	57	4.78
	14-VTR-05	14	1101	0.0200	551	220	0.0100	0.0040	55	4.62
	14-VTR-06	14	998	0.0238	499	200	0.0119	0.0048	42	6.75
	14-VTR-07	14	1054	0.0203	527	211	0.0101	0.0041	52	5.11
	14-VTR-08	14	1060	0.0204	530	212	0.0102	0.0041	52	5.13
	14-VTR-09	14	947	0.0172	474	189	0.0086	0.0034	55	7.52
	14-VTR-10	14	1020	0.0173	510	204	0.0086	0.0035	59	8.11
	14-VTR-11	14	1148	0.0287	574	230	0.0144	0.0057	40	9.1
	14-VTR-12	14	1106	0.0257	553	221	0.0129	0.0051	43	6.12
	14-VTR-13	14	1219	0.0259	610	244	0.0130	0.0052	47	5.04
	14-VTR-14	14	1219	0.0234	610	244	0.0117	0.0047	52	4.99
	14-VTR-15	14	1151	0.0209	576	230	0.0105	0.0042	55	7.76
	14-VTR-16	14	1219	0.0259	610	244	0.0130	0.0052	47	4.99
	14-VTR-17	14	1243	0.0264	622	249	0.0132	0.0053	47	8.94
	14-VTR-18	14	1219	0.0265	610	244	0.0133	0.0053	46	4.98
	14-VTR-19	14	1235	0.0257	618	247	0.0129	0.0051	48	7.92
	14-VTR-20	14	1219	0.0259	610	244	0.0130	0.0052	47	4.97

Tabella 4.5 – Risultati delle prove delle barre con diametro 14 mm sulla base del diametro nominale

Diametro equivalente	Provino	d_b [mm]	$f_{fu,p}$ [MPa]	$\epsilon_{fu,p}$ [MPa]	f_1 [MPa]	f_2 [MPa]	ϵ_1 [-]	ϵ_2 [-]	E_f [GPa]	Durata [min.]
14.03-mm	14-VTR-01	14.08	974	0.0191	487	195	0.0095	0.0038	51	4.94
	14-VTR-02	13.86	1069	0.0184	535	214	0.0092	0.0037	58	6.87
	14-VTR-03	13.85	1057	0.0211	529	211	0.0106	0.0042	50	4.49
	14-VTR-04	14.09	1081	0.0193	541	216	0.0097	0.0039	56	4.78
	14-VTR-05	14.13	1081	0.0200	541	216	0.0100	0.0040	54	4.62
	14-VTR-06	13.97	1017	0.0237	509	203	0.0118	0.0047	43	6.75
	14-VTR-07	13.68	1104	0.0204	552	221	0.0102	0.0041	54	5.11
	14-VTR-08	14.16	1036	0.0207	518	207	0.0104	0.0041	50	5.13
	14-VTR-09	13.92	958	0.0171	479	192	0.0086	0.0034	56	7.52
	14-VTR-10	13.91	1033	0.0172	517	207	0.0086	0.0034	60	8.11
	14-VTR-11	13.91	1163	0.0291	582	233	0.0145	0.0058	40	9.1
	14-VTR-12	14.21	1073	0.0262	537	215	0.0131	0.0052	41	6.12
	14-VTR-13	14.36	1158	0.0257	579	232	0.0129	0.0051	45	5.04
	14-VTR-14	13.94	1229	0.0236	615	246	0.0118	0.0047	52	4.99
	14-VTR-15	13.80	1185	0.0208	593	237	0.0104	0.0042	57	7.76
	14-VTR-16	14.13	1196	0.0254	598	239	0.0127	0.0051	47	4.99
	14-VTR-17	14.13	1220	0.0265	610	244	0.0133	0.0053	46	8.94
	14-VTR-18	14.25	1176	0.0261	588	235	0.0131	0.0052	45	4.98
	14-VTR-19	14.05	1226	0.0255	613	245	0.0128	0.0051	48	7.92
	14-VTR-20	14.11	1200	0.0261	600	240	0.0130	0.0052	46	4.97

Tabella 4.6 – Risultati delle prove delle barre con diametro 14 mm sulla base del diametro equivalente

	Barre D8mm	Barre D 10mm	Barre D 14mm
Diametro equivalente, d_b	8 [mm]	10 [mm]	14 [mm]
Resistenza a trazione media, f_m	1119 [MPa]	1160 [MPa]	1116 [MPa]
Deviazione standard, σ	79 [MPa]	72 [MPa]	96 [MPa]
Resistenza a trazione caratteristica, f_{fk}	986 [MPa]	1039 [MPa]	955 [MPa]
Modulo elastico, E_f	48 [GPa]	50 [GPa]	50 [GPa]
Deformazione a rottura media, ε_{fm}	2.357 [%]	2.528 [%]	2.259 [%]
Deviazione standard, σ	0.294 [%]	0.376 [%]	0.358 [%]
Deformazione a rottura caratteristica, ε_{fk}	1.863 [%]	1.897 [%]	1.657 [%]

N.B. i valori caratteristici sono valutati in accordo al documento CNR-DT200 con la formula $m_x \cdot k_n \sigma$ con k_n pari a 1.68 per test su 20 provini

Tabella 4.7 – Caratteristiche meccaniche sulla base del diametro nominale

	Barre D8mm	Barre D 10mm	Barre D 14mm
Diametro equivalente, d_b	8.07 [mm]	10.11 [mm]	14.03 [mm]
Resistenza a trazione media, f_m	1109 [MPa]	1133 [MPa]	1112 [MPa]
Deviazione standard, σ	93 [MPa]	81 [MPa]	86 [MPa]
Resistenza a trazione caratteristica, f_{fk}	952 [MPa]	997 [MPa]	968 [MPa]
Modulo elastico, E_f	47 [GPa]	49 [GPa]	50 [GPa]
Deformazione a rottura media, ε_{fm}	2.379 [%]	2.517 [%]	2.261 [%]
Deviazione standard, σ	0.300 [%]	0.365 [%]	0.358 [%]
Deformazione a rottura caratteristica, ε_{fk}	1.875 [%]	1.904 [%]	1.660 [%]

N.B. i valori caratteristici sono valutati in accordo al documento CNR-DT200 con la formula $m_x \cdot k_n \sigma$ con k_n pari a 1.68 per test su 20 provini

Tabella 4.8 – Caratteristiche meccaniche sulla base del diametro equivalente

Come si può osservare dalle tabelle di sintesi (Tabella 4.7, 4.8), la differenza tra i diversi diametri delle barre testate non è tale da far osservare qualche fenomeno concernente questa tipologia di barre (i.e. “*shear lag*”, consistente in una diminuzione della resistenza delle barre al crescere del diametro). Infatti, la differenza massima in termini di resistenza a trazione



caratteristica tra i diversi diametri testati è pari a 3.9% e 2.2% per la caratterizzazione meccanica delle stesse in termini di diametro nominale ed equivalente, rispettivamente.

Analogamente, la differenza massima in termini di deformazione caratteristica a rottura tra i diversi diametri testati è pari al 4.2% e 6.4% per la caratterizzazione meccanica delle stesse in termini di diametro nominale ed equivalente, rispettivamente.

Ad ogni modo, tali differenze percentuali rientrano nei termini degli scarti derivanti da prove sperimentali.



CAPITOLO V

ELABORAZIONE STATISTICA

I risultati ottenuti dalle barre testate sono stati sottoposti ad elaborazioni statistiche; tramite l'impiego di test di adattamento, in particolar modo del test di Kolmogorov-Smirnov, si è mostrato che la distribuzione Gaussiana approssima in modo soddisfacente l'andamento della resistenza a trazione della popolazione delle barre testate.

5.1 TEST DI KOLMOGOROV-SMIRNOV

Il test di Kolmogorov-Smirnov è un metodo di analisi statistica che permette di confrontare un campione di dati con una distribuzione teorica (oppure due campioni di dati) allo scopo di verificare l'ipotesi statistica che la popolazione da cui i dati provengono sia quella in esame, con Funzione distribuzione (Cdf) determinata $F_0(x)$ con parametri noti, ovvero se sia valido o meno l'adattamento di questa specifica Cdf al campione in esame.

Per lo svolgimento del test è necessario seguire in modo rigoroso il procedimento che prevede in primo luogo di ordinare in senso crescente le determinazioni del campione. Nella sua formulazione esatta, il test prevede che le variabili aleatorie in esame siano continue.

Il test è stato effettuato sui 3 gruppi di barre caratterizzate da diametri 8, 10 e 14 mm, selezionando dalle prove effettuate un campione casuale costituito da $n=20$ elementi.

Per quanto riguarda barre caratterizzate da un diametro di 8 mm ci si riferisce ai risultati delle prove effettuate sulla base del diametro equivalente.

Ordinate in senso crescente le determinazioni del campione, si costruisce la funzione di distribuzione osservata, che chiameremo $F_n(d_i)$ mediante la relazione:

$$F_n(d_i) = \frac{i}{n}$$



Connettendo i punti determinati dalla relazione appena enunciata si ricava una curva continua. Dopo aver costruito la funzione di distribuzione osservata, la si mette a confronto con quella ipotizzata costruendo la variabile D_n , che verrà poi impiegata come statistica del test. Essa si definisce come il massimo valore assoluto della differenza fra la Cdf campionaria e quella utilizzata.

$$D_n = \max_{i=1}^n |F_n(d_i) - F_0(d_i)|$$

In pratica la statistica D_n indica di quanto le due curve discostano nei punti osservati.

I dati relativi al test di adattamento così eseguito su barre caratterizzate da un diametro di 8 mm sono riportati nella seguente tabella (Tabella 5.1):

DATI			Cdf		D_n	Δ_m	σ_Δ	D_{max}	$D_{n,K-S_{\alpha=0.05}}$	$D_{n,K-S_{\alpha=0.01}}$
Specimen ID	i	Δ_i	$F_{n,i}$	$F_{0,i}$						
8-VTR-18	1	968	0,05	0,065902	0,015902	1108,500	93,2300494	0,150495546	0,294	0,356
8-VTR-17	2	982	0,1	0,087413	0,012587					
8-VTR-16	3	998	0,15	0,117961	0,032039					
8-VTR-05	4	1013	0,2	0,152836	0,047164					
8-VTR-07	5	1040	0,25	0,231248	0,018752					
8-VTR-13	6	1074	0,3	0,355672	0,055672					
8-VTR-09	7	1079	0,35	0,375841	0,025841					
8-VTR-06	8	1082	0,4	0,388112	0,011888					
8-VTR-01	9	1087	0,45	0,408808	0,041192					
8-VTR-15	10	1087	0,5	0,408808	0,091192					
8-VTR-19	11	1096	0,55	0,446671	0,103329					
8-VTR-12	12	1122	0,6	0,557567	0,042433					
8-VTR-03	13	1124	0,65	0,566022	0,083978					
8-VTR-08	14	1128	0,7	0,582838	0,117162					
8-VTR-04	15	1132	0,75	0,599504	0,150496					
8-VTR-11	16	1165	0,8	0,727752	0,072248					
8-VTR-02	17	1174	0,85	0,758836	0,091164					
8-VTR-14	18	1220	0,9	0,884145	0,015855					
8-VTR-10	19	1248	0,95	0,932712	0,017288					
8-VTR-20	20	1351	1	0,995354	0,004646					

Tabella 5.1 – Risultati del test di adattamento delle barre con diametro 8 mm

Dalla tabella risulta che il punto di massima distanza dalla curva ipotizzata è pari a $D_{\max}=0,150495546$. Se poniamo un livello di incertezza dapprima pari ad $\alpha=0,05$, la tabella di Kolmogorov-Smirnov per la curva gaussiana fornisce, in corrispondenza di $n=20$ ed α fissato, un valore $D_n=0,294$; poiché la statistica del test D_{\max} è minore di questo valore, l'ipotesi fatta (campione gaussiano) può essere accettata. Si ripete il procedimento ponendo un livello di incertezza pari ad $\alpha=0,01$, in corrispondenza del quale, sempre per $n=20$, si leggerà un valore $D_n=0,356$. Allo stesso modo, essendo D_{\max} minore di questo valore, l'ipotesi fatta (campione gaussiano) può essere accettata.

I risultati ottenuti da questo primo test di adattamento sono riportati nel seguente grafico (Fig.5.1).

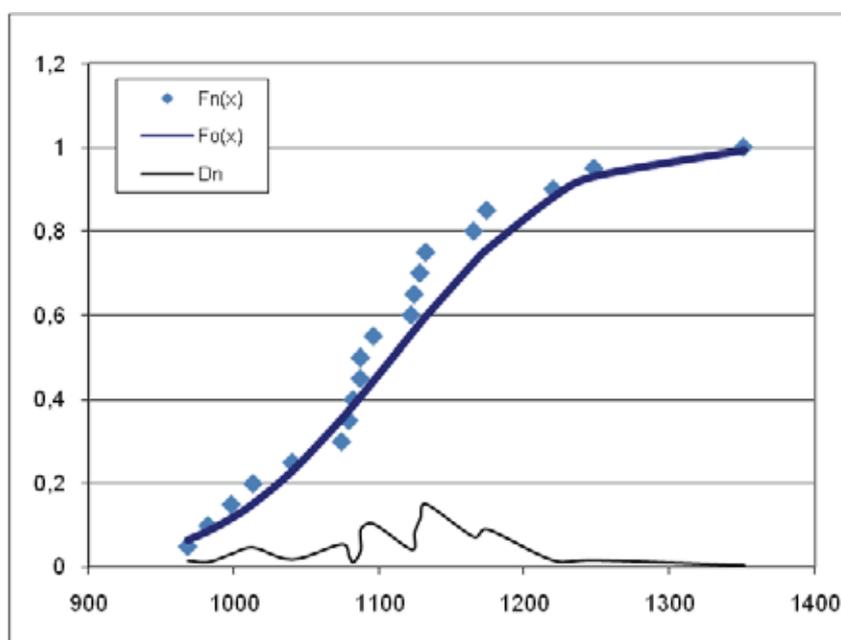


Figura 5.1-Test di Kolmogorov-Smirnov per barre con diametro 8 mm

Il vantaggio di impiegare questo test è nella sua semplicità di implementazione, e soprattutto scaturisce dal fatto che l'esito del test non è condizionato dalla dimensione del campione. Tuttavia, per calcolare la statistica del test occorre conoscere la densità di probabilità o la



funzione di distribuzione della curva ipotizzata dal test, che nel nostro caso si tratta di una distribuzione normale.

Analogamente sono stati effettuati test su campioni casuali (con stessa dimensione $n=20$) per barre caratterizzate rispettivamente da diametri di 10 e 14 mm.

Sono di seguito riportati le tabelle di riferimento ed i grafici rappresentativi dei risultati ottenuti mediante i test di adattamento.

Il test di adattamento effettuato su barre caratterizzate da diametri di 10 mm fa riferimento ai seguenti dati riportati nella Tabella 5.2:

DATI			Cdf							
Specimen ID	i	Δ_i	$F_{n, \delta} / \%$	$F_{0, \delta} / \%$	D_n	Δ_m	σ_Δ	D_{max}	$D_{n,K-S_{\alpha=0.05} / \%$	$D_{n,K-S_{\alpha=0.01} / \%$
10-VTR-18	1	937	0,05	0,007998	0,042002	1132,502	81,15462	0,0778976	0,294	0,356
10-VTR-07	2	1021	0,1	0,08473	0,01527					
10-VTR-06	3	1058	0,15	0,180064	0,030064					
10-VTR-16	4	1068	0,2	0,213366	0,013366					
10-VTR-19	5	1080	0,25	0,258838	0,008838					
10-VTR-15	6	1085	0,3	0,279166	0,020834					
10-VTR-01	7	1089	0,35	0,295968	0,054032					
10-VTR-17	8	1105	0,4	0,367351	0,032649					
10-VTR-05	9	1120	0,45	0,439119	0,010881					
10-VTR-03	10	1130	0,5	0,487513	0,012487					
10-VTR-10	11	1130	0,55	0,488675	0,061325					
10-VTR-02	12	1137	0,6	0,522102	0,077898					
10-VTR-08	13	1158	0,65	0,623672	0,026328					
10-VTR-13	14	1191	0,7	0,765157	0,065157					
10-VTR-09	15	1196	0,75	0,783021	0,033021					
10-VTR-20	16	1197	0,8	0,786624	0,013376					
10-VTR-12	17	1209	0,85	0,827064	0,022936					
10-VTR-14	18	1238	0,9	0,903194	0,003194					
10-VTR-04	19	1249	0,95	0,925247	0,024753					
10-VTR-11	20	1251	1	0,927619	0,072381					

Tabella 5.2 – Risultati del test di adattamento delle barre con diametro 10 mm

Dalla tabella risulta che il punto di massima distanza dalla curva ipotizzata è pari a $D_{\max}=0,0778976$. Se poniamo un livello di incertezza dapprima pari ad $\alpha=0,05$, la tabella di Kolmogorov-Smirnov per la curva gaussiana fornisce, in corrispondenza di $n=20$ ed α fissato, un valore $D_n=0,294$; poiché la statistica del test D_{\max} è minore di questo valore, l'ipotesi fatta (campione gaussiano) può essere accettata. Si ripete il procedimento ponendo un livello di incertezza pari ad $\alpha=0,01$, in corrispondenza del quale, sempre per $n=20$, si leggerà un valore $D_n=0,356$. Allo stesso modo, essendo D_{\max} minore di questo valore, l'ipotesi fatta (campione gaussiano) può essere accettata.

I risultati ottenuti da questo secondo test di adattamento sono riportati nel seguente grafico (Fig.5.2).

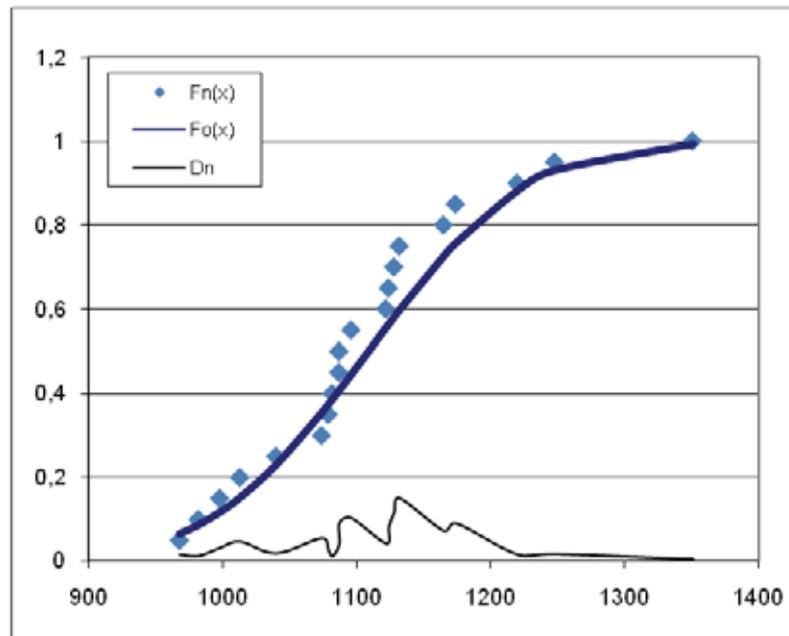


Figura 5.2-Test di Kolmogorov-Smirnov per barre con diametro 10 mm



Il test di adattamento effettuato su barre caratterizzate da diametri di 10 mm fa riferimento ai seguenti dati riportati nella tabella 5.3

Test di adattamento			D14							
DATI			Cdf							
Specimen ID	i	Δ_i	$F_{n, \delta/\%}$	$F_{0, \delta/\%}$	D_n	Δ_m	σ_Δ	D_{max}	$D_{n,K-S_{\alpha=0.05}\%}$	$D_{n,K-S_{\alpha=0.01}\%}$
14-VTR-09	1	958	0,05	0,036319	0,013681	1111,800	85,67785	0,140384	0,294	0,356
14-VTR-01	2	974	0,1	0,053879	0,046121					
14-VTR-06	3	1017	0,15	0,134262	0,015738					
14-VTR-10	4	1033	0,2	0,178858	0,021142					
14-VTR-08	5	1036	0,25	0,188157	0,061843					
14-VTR-03	6	1057	0,3	0,261215	0,038785					
14-VTR-02	7	1069	0,35	0,308698	0,041302					
14-VTR-12	8	1073	0,4	0,325325	0,074675					
14-VTR-04	9	1081	0,45	0,359616	0,090384					
14-VTR-05	10	1081	0,5	0,359616	0,140384					
14-VTR-07	11	1104	0,55	0,463731	0,086269					
14-VTR-13	12	1158	0,6	0,705136	0,105136					
14-VTR-11	13	1163	0,65	0,724942	0,074942					
14-VTR-18	14	1176	0,7	0,773167	0,073167					
14-VTR-15	15	1185	0,75	0,803548	0,053548					
14-VTR-16	16	1196	0,8	0,837135	0,037135					
14-VTR-20	17	1200	0,85	0,848363	0,001637					
14-VTR-17	18	1220	0,9	0,896682	0,003318					
14-VTR-19	19	1226	0,95	0,908718	0,041282					
14-VTR-14	20	1229	1	0,914331	0,085669					

Tabella 5.3 – Risultati delle test di adattamento delle barre con diametro 14 mm

Dalla tabella risulta che il punto di massima distanza dalla curva ipotizzata è pari a $D_{max}=0,140384$. Se poniamo un livello di incertezza dapprima pari ad $\alpha=0,05$, la tabella di Kolmogorov-Smirnov per la curva gaussiana fornisce, in corrispondenza di $n=20$ ed α fissato, un valore $D_n=0,294$; poiché la statistica del test D_{max} è minore di questo valore, l'ipotesi fatta (campione gaussiano) può essere accettata. Si ripete il procedimento ponendo un livello di

incertezza pari ad $\alpha=0,01$, in corrispondenza del quale, sempre per $n=20$, si leggerà un valore $D_n=0,356$. Allo stesso modo, essendo D_{max} minore di questo valore, l'ipotesi fatta (campione gaussiano) può essere accettata.

I risultati ottenuti da questo terzo test di adattamento sono riportati nel seguente grafico (Fig.5.3).

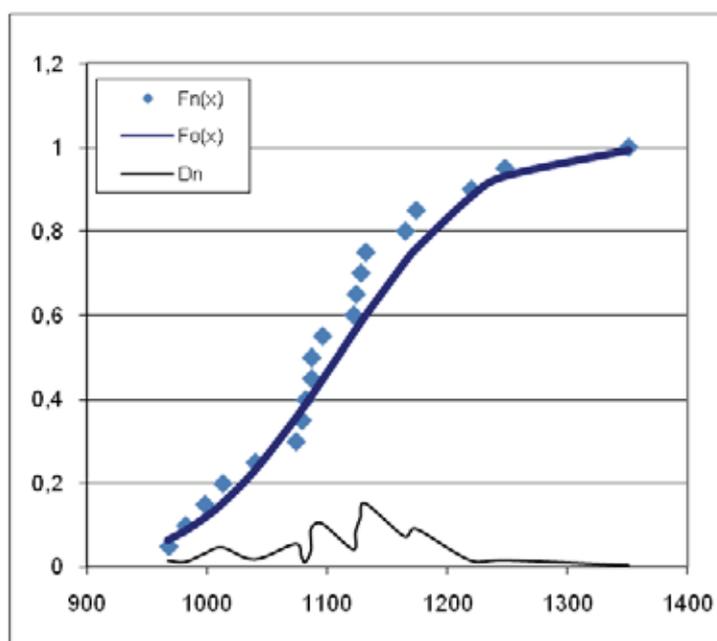


Figura 5.3-Test di Kolmogorov-Smirnov per barre con diametro 14 mm

5.2 APPLICAZIONE DELL'ANOVA TEST PER BARRE DI DIFFERENTE DIAMETRO

Applicando la procedura descritta nel paragrafo 3.2 è possibile confrontare il comportamento di tre differenti popolazioni. Anche in questo caso l'ANOVA test è stato eseguito tre volte, dapprima basandosi sui valori di resistenza a trazione, successivamente richiamando i valori del modulo elastico ed infine considerando la deformazione ultima delle barre.

Sono stati sottoposti all'analisi della varianza tre gruppi, costituiti ognuno da 20 campioni.



Nel primo test per ogni campione viene riportato il valore di resistenza a trazione che lo caratterizza, nelle tabelle che seguono (Tabella 5.4, 5.5, 5.6), oltre ad esso, vengono mostrati i valori di:

- Media;
- Deviazione Standard;
- Varianza;
- Coefficiente di variazione.

Specimen Number	Specimen ID	f_{tu} [MPa]	Media	Deviazione standard	Varianza	CV
#1	8-VTR-02	1087	1109	93,23	8692	8,4%
#2	8-VTR-03	1174				
#3	8-VTR-04	1124				
#4	8-VTR-05	1132				
#5	8-VTR-06	1013				
#6	8-VTR-07	1082				
#7	8-VTR-08	1040				
#8	8-VTR-09	1128				
#9	8-VTR-11	1079				
#10	8-VTR-12	1248				
#11	8-VTR-13	1165				
#12	8-VTR-14	1122				
#13	8-VTR-15	1074				
#14	8-VTR-16	1220				
#15	8-VTR-17	1087				
#16	8-VTR-18	998				
#17	8-VTR-19	982				
#18	8-VTR-20	968				
#19	8-VTR-21	1096				
#20	8-VTR-22	1351				

Tabella 5.4 – Dati relativi al primo gruppo costituito da barre con diametro 8 mm riferendosi ai valori di resistenza a trazione.



Specimen Number	Specimen ID	f_{tu} [MPa]	Media	Deviazione standard	Varianza	CV
#21	10-VTR-01	1089	1133	81,15	6586	7,2%
#22	10-VTR-02	1137				
#23	10-VTR-03	1130				
#24	10-VTR-04	1249				
#25	10-VTR-05	1120				
#26	10-VTR-07	1058				
#27	10-VTR-08	1021				
#28	10-VTR-09	1158				
#29	10-VTR-10	1196				
#30	10-VTR-12	1130				
#31	10-VTR-13	1251				
#32	10-VTR-14	1209				
#33	10-VTR-15	1191				
#34	10-VTR-16	1238				
#35	10-VTR-17	1085				
#36	10-VTR-18	1068				
#37	10-VTR-21	1105				
#38	10-VTR-26	937				
#39	10-VTR-28	1080				
#40	10-VTR-29	1197				

Tabella 5.5 – Dati relativi al secondo gruppo costituito da barre con diametro 10 mm riferendosi ai valori di resistenza a trazione.



Specimen Number	Specimen ID	f_{tu} [MPa]	Media	Deviazione standard	Varianza	CV
#41	14-VTR-01	974	1112	85,68	7341	7,7%
#42	14-VTR-02	1069				
#43	14-VTR-03	1057				
#44	14-VTR-04	1081				
#45	14-VTR-05	1081				
#46	14-VTR-06	1017				
#47	14-VTR-07	1104				
#48	14-VTR-08	1036				
#49	14-VTR-10	958				
#50	14-VTR-13	1033				
#51	14-VTR-14	1163				
#52	14-VTR-15	1073				
#53	14-VTR-17	1158				
#54	14-VTR-19	1229				
#55	14-VTR-20	1185				
#56	14-VTR-21	1196				
#57	14-VTR-22	1220				
#58	14-VTR-23	1176				
#59	14-VTR-26	1226				
#60	14-VTR-27	1200				

Tabella 5.6 – Dati relativi al terzo gruppo costituito da barre con diametro 14 mm riferendosi ai valori di resistenza a trazione .

Si procede calcolando i gradi di libertà della devianza tra i gruppi (*between*) tramite la relazione $df_{\text{between}}=(n-1)$, con n il numero dei gruppi, nel caso in esame $n=3$.

Si avrà, dunque:

$$df_{\text{between}} = (n-1) = 2$$

Il passo successivo prevede il calcolo dei gradi di libertà della devianza interna ai gruppi (*within*) tramite la relazione $df_{\text{within}}=n(m-1)$, con m il numero dei dati all'interno di ciascun gruppo, nel caso in esame $m=20$.

Si avrà:



$$df_{\text{within}} = n(m-1) = 57$$

Successivamente, si passa alla determinazione della devianza tra i trattamenti (*Sum of Squares between*):

$$SSB = SQ_{\text{tra}} = m \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - \bar{x})^2 = 6770$$

Allo stesso modo si calcola la devianza entro i trattamenti (*Sum of Square Within*) come:

$$SSW = SQ_{\text{entro}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\bar{x}_{ij} - x_i)^2 = 429754$$

La devianza totale sarà data dalla somma di queste due aliquote:

$$SST = SSB + SSW = 436524.$$

Andando a dividere SSB ed SSW per i rispettivi gradi di libertà si giungerà alla determinazione di:

- MSB (*Mean Square Between*) = $SSB / df_{\text{between}} = 3385$;
- MSW (*Mean Square Within*) = $SSW / df_{\text{within}} = 7540$.

E' possibile ora passare alla determinazione dell'indice F ottenuto come rapporto:

$$F = MSB / MSW = 0,45$$

Il valore di significatività, ovvero la probabilità che tali risultati siano attendibili, detto anche F-value risulta essere pari a circa il 64%.

Nella seguente tabella (Tabella 5.7) vengono mostrati nuovamente i risultati fin'ora ottenuti:

SSb	SSw	TOTAL	dfbetween	dfwithin	MSb	MSw	F	F-value
6770	429754	436524	2	57	3385	7540	0,45	64,05205%

Tabella 5.7 – Procedura primo test ANOVA.



Il valore di F critico, che dovrà risultare superiore ad F, è stato ricavato tramite interpolazione lineare dai valori riportati nella tabella relativa al 95° percentile della pdf di Fisher in corrispondenza dei gradi di libertà $v_1=57$ e $v_2=2$.

F-crit=3,158842719

Di seguito è riportata una tabella riassuntiva (Tabella 5.8):

ANALISI VARIANZA						
Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Tra gruppi	6770	2	3385	0,45	0,64	3,158
In gruppi	429754	57	7540			
Totale	4365234	59				

Tabella 5.8 – Tabella riassuntiva primo test ANOVA

L'analisi della varianza è stata ripetuta facendo riferimento ai valori del modulo elastico ottenuti in ogni prova. In modo analogo è stata applicata la stessa procedura ed i risultati ottenuti sono i seguenti (Tabella 5.9, 5.10, 5.11):

Specimen Number	Specimen ID	E[GPa]	Media	Deviazione standard	Varianza	CV
#1	8-VTR-01	44	47	4,76	23	10,1%
#2	8-VTR-03	43				
#3	8-VTR-04	40				
#4	8-VTR-05	42				
#5	8-VTR-06	40				
#6	8-VTR-07	53				
#7	8-VTR-08	43				
#8	8-VTR-09	53				
#9	8-VTR-11	51				
#10	8-VTR-12	47				
#11	8-VTR-13	49				
#12	8-VTR-14	43				
#13	8-VTR-15	47				
#14	8-VTR-16	48				
#15	8-VTR-17	43				
#16	8-VTR-18	52				
#17	8-VTR-19	53				
#18	8-VTR-20	53				



#19	8-VTR-21	44				
#20	8-VTR-22	53				

Tabella 5.9 – Dati relativi al primo gruppo costituito da barre con diametro 8mm riferendosi ai valori di modulo elastico.

Specimen Number	Specimen ID	E[GPa]	Media	Deviazione standard	Varianza	CV
#21	10-VTR-01	51	49	3,78	14	7,7%
#22	10-VTR-02	45				
#23	10-VTR-03	50				
#24	10-VTR-04	50				
#25	10-VTR-05	43				
#26	10-VTR-07	54				
#27	10-VTR-08	44				
#28	10-VTR-09	56				
#29	10-VTR-10	46				
#30	10-VTR-12	51				
#31	10-VTR-13	50				
#32	10-VTR-14	54				
#33	10-VTR-15	43				
#34	10-VTR-16	51				
#35	10-VTR-17	48				
#36	10-VTR-18	47				
#37	10-VTR-21	45				
#38	10-VTR-26	51				
#39	10-VTR-28	48				
#40	10-VTR-29	52				

Tabella 5.10 – Dati relativi al secondo gruppo costituito da barre con diametro 10 mm riferendosi ai valori di modulo elastico.



Specimen Number	Specimen ID	E[GPa]	Media	Deviazione standard	Varianza	CV
#41	14-VTR-01	51	50	5,84	34	11,7%
#42	14-VTR-02	58				
#43	14-VTR-03	50				
#44	14-VTR-04	56				
#45	14-VTR-05	54				
#46	14-VTR-06	43				
#47	14-VTR-07	54				
#48	14-VTR-08	50				
#49	14-VTR-10	56				
#50	14-VTR-13	60				
#51	14-VTR-14	40				
#52	14-VTR-15	41				
#53	14-VTR-17	45				
#54	14-VTR-19	52				
#55	14-VTR-20	57				
#56	14-VTR-21	47				
#57	14-VTR-22	46				
#58	14-VTR-23	45				
#59	14-VTR-26	48				
#60	14-VTR-27	46				

Tabella 5.11 – Dati relativi al terzo gruppo costituito da barre con diametro 14mm riferendosi ai valori di modulo elastico.

SSb	SSw	TOTAL	dfbetween	dfwithin	MSb	MSw	F	F-value
87	1349	1436	2	57	43	24	1,83	16,908%

Tabella 5.12 – Procedura secondo test ANOVA

Anche in questo caso, come mostra la tabella riassuntiva (Tabella 5.12), il valore di F risulta essere inferiore all’F-critico, in quanto:

F-critico=3,158.



L'analisi della varianza è stata ripetuta facendo riferimento ai valori di deformazione ultima delle barre ottenuti in ogni prova.

In modo analogo è stata applicata la stessa procedura ed i risultati ottenuti sono i seguenti (Tabella 5.13, 5.14, 5.15):

Specimen Number	Specimen ID	ϵ_{tu} [%]	Media	Deviazione standard	Varianza	CV
#1	8-VTR-02	0,0247	0,0238	0,0030	0,0000	12,6%
#2	8-VTR-03	0,0273				
#3	8-VTR-04	0,0281				
#4	8-VTR-05	0,0270				
#5	8-VTR-06	0,0253				
#6	8-VTR-07	0,0204				
#7	8-VTR-08	0,0242				
#8	8-VTR-09	0,0213				
#9	8-VTR-11	0,0212				
#10	8-VTR-12	0,0266				
#11	8-VTR-13	0,0238				
#12	8-VTR-14	0,0261				
#13	8-VTR-15	0,0229				
#14	8-VTR-16	0,0254				
#15	8-VTR-17	0,0253				
#16	8-VTR-18	0,0192				
#17	8-VTR-19	0,0185				
#18	8-VTR-20	0,0183				
#19	8-VTR-21	0,0249				
#20	8-VTR-22	0,0255				

Tabella 5.13 – Dati relativi al primo gruppo costituito da barre con diametro 8mm riferendosi ai valori di deformazione ultima.



Tabella 5.13 – Dati relativi al primo gruppo costituito da barre con diametro 8mm riferendosi ai valori di deformazione ultima.

Specimen Number	Specimen ID	ϵ_{ru} [%]	Media	Deviazione standard	Varianza	CV
#21	10-VTR-01	0,0214	0,0252	0,0036	0,0000	14,5%
#22	10-VTR-02	0,0296				
#23	10-VTR-03	0,0264				
#24	10-VTR-04	0,0316				
#25	10-VTR-05	0,0306				
#26	10-VTR-07	0,0232				
#27	10-VTR-08	0,0232				
#28	10-VTR-09	0,0243				
#29	10-VTR-10	0,0260				
#30	10-VTR-12	0,0260				



Specimen Number	Specimen ID	ε_{fu} [%]	Media	Deviazione standard	Varianza	CV
#41	14-VTR-01	0,0191	0,0226	0,0036	0,0000	15,8%
#42	14-VTR-02	0,0184				
#43	14-VTR-03	0,0211				
#44	14-VTR-04	0,0193				
#45	14-VTR-05	0,0200				
#46	14-VTR-06	0,0237				
#47	14-VTR-07	0,0204				
#48	14-VTR-08	0,0207				
#49	14-VTR-10	0,0171				
#50	14-VTR-13	0,0172				
#51	14-VTR-14	0,0291				
#52	14-VTR-15	0,0262				
#53	14-VTR-17	0,0257				
#54	14-VTR-19	0,0236				
#55	14-VTR-20	0,0208				
#56	14-VTR-21	0,0254				
#57	14-VTR-22	0,0265				
#58	14-VTR-23	0,0261				
#59	14-VTR-26	0,0255				
#60	14-VTR-27	0,0261				

Tabella 5.15 – Dati relativi al terzo gruppo costituito da barre con diametro 14mm riferendosi ai valori di deformazione ultima.

SSb	SSw	TOTAL	dfbetween	dfwithin	MSb	MSw	F	F-value
0	0,001	0,001	2	57	0	0	2,910	6,3%

Tabella 5.16 – Procedura terzo test ANOVA

Anche in questo caso, come mostra la tabella riassuntiva (Tabella 5.16), il valore di F risulta essere inferiore all’F-critico



CAPITOLO VI

CONCLUSIONI

Sulla base dei risultati ottenuti dallo studio statistico effettuato è possibile concludere che la strumentazione proposta risulta valida al fine della valutazione e caratterizzazione delle proprietà meccaniche di barre in GFRP. Infatti, nel confrontare i risultati ottenuti da prove di trazione effettuate sia attraverso l'impiego della macchina universale che tramite la strumentazione proposta su 5 provini di barre in GFRP, caratterizzate da un diametro nominale pari a 10 mm, applicando l'ANOVA test ai valori di resistenza a trazione relativi ai due gruppi in esame, ne è scaturito un livello di significatività del test pari circa al 74%, risultato che non mette in discussione la validità dell'ipotesi di base. Allo stesso modo, ripetendo l'analisi della varianza basandosi sui valori di modulo elastico e di deformazione ultima, i test hanno fornito i rispettivi livelli di significatività: 75% e 30%.

A seguito di questi risultati è stato possibile testare tre gruppi di barre caratterizzate da differente diametro con la strumentazione proposta ed applicare il metodo dell'Analisi della Varianza tra i gruppi in esame, costituiti ognuno da 20 barre, ottenendo, anche in questo caso, riscontri soddisfacenti; infatti, facendo riferimento ai valori di resistenza a trazione si è raggiunto un livello di significatività pari al 64%.

Le stesse analisi sono state portate avanti richiamando i valori del modulo elastico e di deformazione ultima delle barre.

Mettendo a confronto i valori di modulo elastico relativi ai tre gruppi di barre caratterizzate da diametri 8, 10, 14 mm si è giunti a un livello di significatività del test pari al 17%.

Confrontando, invece, i valori di deformazione ultima il livello di significatività del test è sceso al 6%, risultando, però, sempre valido.



Dunque, grazie ai risultati ottenuti, la strumentazione proposta può essere impiegata come alternativa efficace e idonea per l'effettuazione di prove a trazione di barre in FRP, risultando, inoltre, conforme con le direttive dell'ASTM D7205.

**BIBLIOGRAFIA**

1. ACI 440.3R-04. “Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures”. American Concrete Institute, 2004.
2. Ahmed Ehab A., El-Salakawy Ehab F. and Benmokrane B., “Mechanical and Structural Characterization of New Carbon FRP Stirrups for Concrete Members”.
3. CNR DT203/2006. “Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Armato con Barre di Materiale Composito Fibrorinforzato”. Consiglio Nazionale delle Ricerche, 2006.
4. Erto P. “Probabilità e statistica per le scienze e l’ingegneria”, McGraw-Hill, Terza edizione, 2008
5. ACI 440. 1R-06. “Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars”.
6. Japan Society of Civil Engineers (JSCE), “Reccomendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforced Materials”, 1997.
7. Kumara et al., 1983



8. ACI 440.1R-03. “Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars”.

9. CAN/CSA-S6-00, 2000. “Canadian Highway Bridge Design Code”. Canadian Standard Association (CSA).

10. CAN/CSA-S6-02, 2002. “Design and Construction of Buildings Components with Fiber-Reinforced Polymers”. Canadian Standard Association (CSA).

11. fib, 2005. “FRP Reinforcement for RC Structures”.

12. ASTM D7205. “Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars”.