





UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA  
Dipartimento di Strutture

Giulia Salatino

**STUDIO SPERIMENTALE DEL COMPORTAMENTO VISCOSO  
DI BARRE DI GFRP**

Tesi di Dottorato in Ingegneria dei Materiali e delle  
Strutture

**Sezione: Ingegneria dei Materiali e delle Strutture**

Scuola Pitagora in Scienze Ingegneristiche

Ciclo XXIV (2008 - 2011)

S.S.D. ICAR 08 - Scienza delle Costruzioni

*Coordinatore:* *prof. Renato S. Olivito*

*Tutor:* *prof. Renato S. Olivito*





*A mio figlio*



## *Ringraziamenti*

Al termine di questo percorso, che ha costituito per me un'esperienza forte ed indimenticabile, desidero sinceramente e con grande affetto ringraziare il prof. Renato Olivito, mio tutor nel presente lavoro di ricerca, per il contributo che costantemente mi ha fornito durante questi anni, sia dal punto di vista professionale e scientifico, che umano.

Per il sostegno, la disponibilità e la pazienza che ha dimostrato nei miei confronti, anche nei momenti di abbattimento, dovuti alle inevitabili difficoltà incontrate nello svolgimento della ricerca.

Un particolare ringraziamento va anche al prof. Venanzio Greco, che mi ha seguito per gli aspetti geotecnici della ricerca, consentendomi di sviluppare un'applicazione degli studi fatti sulle barre.

Ringrazio ancora l'ing. Antonio Carrozzini per il valido supporto tecnico in laboratorio, necessario per la realizzazione delle prove sperimentali ed in generale tutti i tecnici di laboratorio per la disponibilità e la cortesia sempre dimostrate.

Un pensiero speciale va a mio padre, che mi ha sempre sostenuto ed incoraggiato negli studi e nella vita, insegnandomi che non bisogna mai arrendersi di fronte alle difficoltà. Se fosse ancora tra noi, sarebbe orgoglioso di me.

L'impegno e l'entusiasmo con cui ho affrontato questa esperienza li dedico a mio figlio, perché anche lui capisca quali sono i valori che contano nella vita.



<b>INTRODUZIONE</b> .....	1
<b>1. I MATERIALI COMPOSITI FRP: CARATTERISTICHE E MODALITÀ DI IMPIEGO</b>	
1.1. Caratteristiche dei compositi ed inquadramento normativo .....	7
1.2. Le fibre .....	9
1.3. Le matrici .....	12
1.4. Caratteristiche delle barre di FRP .....	13
1.5. Applicazione dei materiali compositi nell'Ingegneria Civile .....	19
<b>2. FORMULAZIONE ANALITICA DEL FENOMENO DEL CREEP: TEORIA DI FINDLEY</b>	
2.1. La durabilità dei materiali compositi .....	25
2.2. Il fenomeno del creep .....	28
2.2.1. Modelli viscoelastici elementari: Il modello di Maxwell ..	29
2.3. Il creep nei materiali compositi FRP .....	34
2.4. L'equazione di Findley .....	36
<b>3. ATTREZZATURE E PROCEDURA SPERIMENTALE</b>	
3.1. Materiali .....	39
3.2. Attrezzature .....	40
3.3. Macchinari e procedura sperimentale .....	47
<b>4. RISULTATI E DISCUSSIONE</b>	
4.1. Prove di caratterizzazione meccanica .....	53

4.2. Prove di creep . . . . .	56
4.2.1. Prove di creep con carico all'80% . . . . .	58
4.2.2. Prove di creep con carico al 70% . . . . .	63
4.2.3. Prove di creep con carico al 60% . . . . .	71
4.2.4. Prove di creep con carico al 50% . . . . .	75
<b>5. PROGETTO DI UN TIRANTE CON BARRE DI FRP</b>	
5.1. Introduzione . . . . .	81
5.2. Caratteristiche del prototipo di tirante . . . . .	84
5.3. Materiali impiegati . . . . .	85
5.4. Caratteristiche costruttive . . . . .	86
5.4.1. Tirante tipo A . . . . .	88
5.4.2. Tirante tipo B . . . . .	90
5.4.3. Piastra di testata . . . . .	92
5.5. Calcolo della capacità portante . . . . .	93
5.6. Ulteriori sviluppi . . . . .	96
5.7. Considerazioni conclusive . . . . .	97
<b>6. CONCLUSIONI . . . . .</b>	<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAFIA . . . . .</b>	<b>105</b>

## ***INTRODUZIONE***

Il presente lavoro di tesi illustra i risultati di un'indagine sperimentale sul comportamento a creep di barre in materiale composito fibrorinforzato con fibre di vetro (GFRP).

L'ambito in cui si colloca la ricerca è quello dell'uso di tali materiali nell'Ingegneria Civile come elementi per il ripristino o consolidamento di strutture esistenti (sia edifici storici in muratura, che strutture più moderne in c.a.) o come elementi di armatura nel calcestruzzo in sostituzione delle barre in acciaio.

Tra le varie forme con cui tali elementi sono disponibili in commercio, si è focalizzata l'attenzione sulle barre di composito con fibre di vetro (GFRP).

I materiali compositi fibro-rinforzati (FRP) hanno catturato l'interesse della ricerca in tutto il mondo grazie alle loro notevoli proprietà, come sarà più dettagliatamente esposto nel Capitolo 1 e cioè: elevate caratteristiche meccaniche, basso peso specifico, resistenza ai fenomeni corrosivi. Molte conferenze internazionali hanno reso possibile condividere le conoscenze acquisite, descrivere l'avanzamento dei lavori e produrre diversi manuali e codici progettuali.

La corrosione dovuta ai cloruri e/o alla carbonatazione è la principale causa di deterioramento delle strutture in c.a. Basti pensare alle solette da ponte soggette a cicli di gelo-disgelo in condizioni climatiche particolarmente rigide e all'azione aggressiva dei sali disgelanti, che favoriscono la corrosione delle barre metalliche d'armatura. Tutto ciò comporta una notevole riduzione della vita di servizio della struttura ed un notevole aumento dei costi di manutenzione per il necessario ripristino o il rafforzamento.

I costi di riparazione e ristrutturazione rappresentano, per la maggior parte dei paesi del mondo, un'alta percentuale dell'intera spesa che tali paesi destinano alle infrastrutture.

Ma anche le altre proprietà citate, non meno importanti, rendono attrattivo l'uso degli FRP ed in particolare l'alta resistenza a trazione in ragione di un basso peso specifico, che incide sulla riduzione dei costi di trasporto e di movimentazione. Inoltre, la proprietà degli FRP di non interferire con i campi elettromagnetici può risultare risolutiva in alcuni ambiti speciali, come ad

esempio nella realizzazione di sale ospedaliere, dove si devono evitare interferenze con le più moderne attrezzature per la risonanza magnetica e per la diagnostica ad immagini.

Nei paesi più industrializzati esistono numerosi esempi di costruzioni in conglomerato cementizio armato con barre di FRP, mentre in Italia non accade lo stesso, in quanto le poche applicazioni hanno finora riguardato quasi esclusivamente il campo del restauro strutturale. L'impiego di barre di FRP per la realizzazione di nuove costruzioni non è ancora decollato, se non per applicazioni marginali o di tipo provvisoriale e la quasi totalità della produzione nazionale è destinata all'esportazione.

In ambito internazionale, la diffusione delle barre di FRP come armatura del calcestruzzo è stata sostenuta e incoraggiata dall'emanazione di specifiche istruzioni tecniche e/o di linee guida. Il Giappone è stato il Paese che maggiormente si è distinto in tal senso, rilasciando già nel 1997 le prime linee guida di tipo progettuale, tradotte poco tempo dopo in inglese. In Canada, nel 1996, sono state licenziate ulteriori linee guida [6], seguite nel 2000 da quelle redatte a cura dell'ACI, successivamente aggiornate nel 2006 [5]. Solo recentemente anche in Italia, precisamente nel 2006, è stato rilasciato dal CNR un documento tecnico orientato alla progettazione ed alla realizzazione di costruzioni di conglomerato cementizio armato con barre di FRP, il CNR DT 203/2006 [2]. Non sempre, infatti, i modelli e gli approcci computazionali sviluppati nel corso degli anni per gli elementi armati con barre di acciaio possono essere utilizzati direttamente anche nel caso di armature di FRP. Basta riflettere, ad esempio, sul diverso comportamento costitutivo esibito dalle barre di FRP, che, a differenza delle barre di acciaio, è sostanzialmente elastico lineare fino a rottura con completa assenza della fase di snervamento. Ciò rappresenta un'importante discriminante tra le due tipologie di materiale, che deve tenersi in particolare conto nella progettazione antisismica.

Allo scopo di promuovere una sempre più ampia diffusione di applicazioni e interventi che prevedano l'uso di barre in materiale composito nel campo dell'Ingegneria Civile, si è ritenuto importante studiarne alcuni aspetti, ad oggi ancora non molto investigati, legati alla loro durabilità e affidabilità nel tempo.

In particolare, nel presente lavoro è stato studiato sperimentalmente il comportamento a creep di barre di GFRP.



Il creep, ossia quel fenomeno che provoca aumento di deformazione nel tempo a carico costante, può dare origine a danneggiamento e portare a rottura il materiale anche per carichi inferiori alla resistenza statica del materiale (carico medio di rottura). Allo stato attuale non esistono modelli o leggi ufficialmente riconosciuti che consentano di prevedere il comportamento a creep degli FRP. Sull'argomento le attuali linee guida disponibili in campo internazionale, tra cui le Istruzioni CNR-DT 203/2006, consentono di tener conto dei fenomeni viscosi in maniera forfettaria, attraverso l'introduzione di opportuni fattori riduttivi delle tensioni di progetto che risultano abbastanza cautelativi.

Le cause del fenomeno del creep per i materiali compositi e la sua formulazione analitica vengono affrontate nel Capitolo 2. Tra i vari modelli disponibili in letteratura per la descrizione del problema, si è scelto di utilizzare l'equazione di Findley, che consiste in un'equazione di natura sperimentale del tipo "legge di potenza" che utilizza due parametri, detti parametri di Findley, che possono determinarsi sottoponendo il materiale in esame a prove di creep.

Le indagini sperimentali, descritte nel Capitolo 3, sono state eseguite presso il Laboratorio Ufficiale di Prove sui Materiali e sulle Strutture del Dipartimento di Strutture dell'Università della Calabria.

Sono state eseguite dapprima prove finalizzate alla caratterizzazione meccanica delle barre, ossia prove di trazione diretta, al fine di verificare i valori di resistenza dichiarati nella documentazione tecnica relativa al prodotto. Successivamente sono stati sottoposti provini delle stesse barre a prove di trazione con carico costante nel tempo, al fine di studiare il fenomeno del creep.



Laboratorio Ufficiale di Prove Materiali e Strutture UNICAL

Il carico è stato applicato longitudinalmente, cioè nella direzione delle fibre lunghe di cui sono composte le barre e sono state eseguite prove per diversi valori del carico e per diverse durate. Per le modalità di esecuzione delle prove e la preparazione dei campioni di barre si è tenuto conto delle indicazioni fornite dai documenti tecnici attualmente disponibili per l'esecuzione di tali prove ed in particolare:

- le istruzioni CNR-DT 203/2006, *“Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Armato con Barre di Materiale Composito Fibrorinforzato”*. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, Italia, 2006
- il documento ACI 440.3R-04, *“Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures”*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, USA, 2004.

Per garantire una maggiore aderenza alle barre utilizzate, che presentano una superficie laterale piuttosto liscia, è stato progettato un nuovo dispositivo di ancoraggio dei provini, in alluminio a sezione parallelepipedica cava, descritto

nel Capitolo 3, diverso sia da quello suggerito nei documenti ACI [4] e CNR [2] appena citati e diverso anche da quello tubolare in rame già utilizzato in una prima fase sperimentale.

I risultati della ricerca condotta sono stati riportati e discussi nel Capitolo 4. Obiettivo della ricerca è di contribuire a caratterizzare il comportamento del materiale a lungo termine, in modo da stabilire quanto e in che modo le deformazioni viscosse delle barre di GFRP, prodotte da carichi di lunga durata e legate sostanzialmente alle proprietà viscosse della matrice polimerica, possano influenzare le prestazioni di una struttura, modificandone o meno il grado di sicurezza originario.

Una parte della ricerca, descritta nel Capitolo 5, è stata infine dedicata al progetto di un tirante, utilizzabile per l'ancoraggio di opere di contenimento, la cui caratteristica principale è costituita dall'impiego di barre di materiale composito fibrorinforzato FRP, in sostituzione dei tradizionali cavi metallici di armatura.

Lo scopo è di realizzare un elemento strutturale leggero, maneggevole ed assolutamente resistente alla corrosione, ma capace allo stesso tempo di offrire considerevoli capacità portanti.

E' noto, infatti, che per le opere di ancoraggio nel terreno la corrosione delle barre metalliche è riconosciuta come la maggiore causa di deterioramento e di riduzione della vita di servizio dell'intera struttura. L'uso degli FRP consente di eliminare questo problema e quindi di allungare notevolmente la vita utile dei tiranti.

Sono state fornite le caratteristiche tecnico-costruttive e le capacità portanti del prototipo di tirante ideato.

La fase di sperimentazione, che dovrà ancora essere eseguita, servirà a confermare l'efficacia di alcuni particolari costruttivi, per consentire di verificare la piena rispondenza del prototipo alle attese progettuali.



## CAPITOLO 1

### *I materiali compositi FRP: caratteristiche e modalità di impiego*

#### **1.1 Caratteristiche dei compositi ed inquadramento normativo**

I materiali fibrorinforzati a matrice polimerica, definiti con l'acronimo FRP (Fiber Reinforced Polymers), sono materiali compositi costituiti da una matrice polimerica e da una fibra di rinforzo. La matrice ha la funzione di dare forma al pezzo, nonché di proteggere e trasferire i carichi alla fibra. La fibra ha la funzione di sopportare i carichi trasmessi dalla matrice e di conferire al pezzo adeguate proprietà meccaniche.

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

Nella realizzazione dei compositi, le fibre possono essere *continue* (lunghe) o *discontinue* (corte). Le fibre più usate per la realizzazione dei materiali compositi sono: di carbonio (ed in tal caso il composito viene indicato con l'acronimo CFRP), di vetro (GFRP) e di aramide (AFRP) (Fig. 1.1).



Figura 1.1: Diversi tipi di fibra

I compositi FRP sono disponibili in commercio in varie forme: nastri, lamine e tessuti (per rinforzi esterni) o barre e griglie (come armatura di strutture in calcestruzzo).

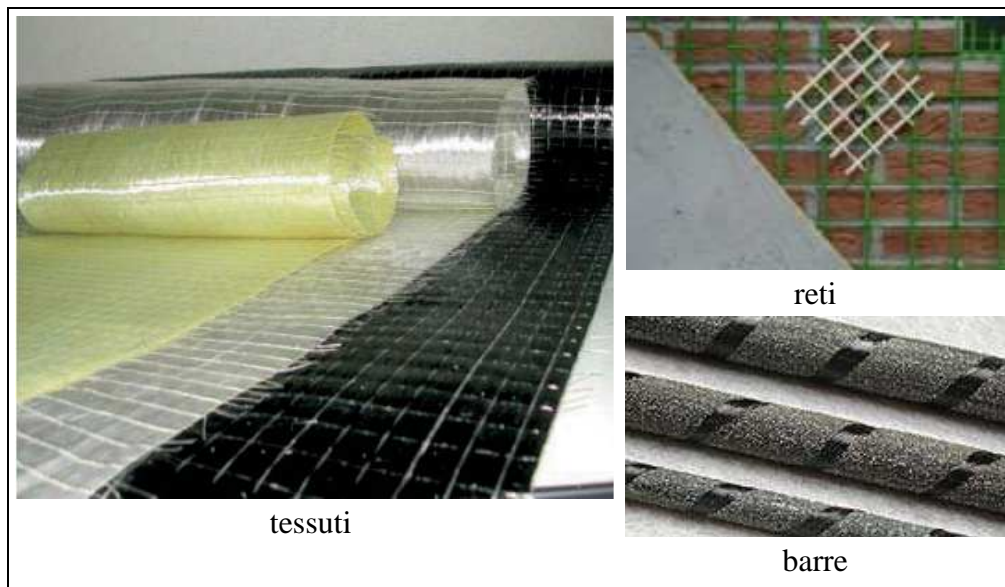


Figura 1.2: Varie tipologie di materiali usati per i rinforzi

Anche in Italia, facendo seguito alle istruzioni e/o linee guida internazionali già esistenti [3,5], sono state emanate nel 2004 ad opera del CNR apposite istruzioni sull'utilizzo dei materiali compositi negli interventi di consolidamento statico, precisamente il Documento Tecnico DT 200/2004 [1] e successivamente nel 2006 il DT 203/2006 [2] che disciplina e fornisce un

insieme di principi e regole applicative da utilizzare nell'impiego di barre di FRP come armatura di getti di conglomerato cementizio.

## 1.2 Le fibre

Le fibre di carbonio si ottengono con un processo industriale ad alta temperatura (carbonizzazione) da particolari fibre organiche dette "precursori", tra cui il più usato è il *poliacrilonitrile*, noto con il suo acronimo PAN. A seconda del precursore utilizzato e dei parametri del processo, si possono ottenere fibre di carbonio con resistenze meccaniche a trazione comprese tra 1800 e 3500 MPa e modulo elastico compreso tra 200 e 650 GPa. Più alto è il modulo elastico, più pregiate e costose sono le fibre.

Le fibre di carbonio sono quindi usate per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni e modulo elastico medio-alto, largamente usati per la realizzazione di interventi di recupero strutturale, sia su strutture murarie ma soprattutto per le strutture in c.a.

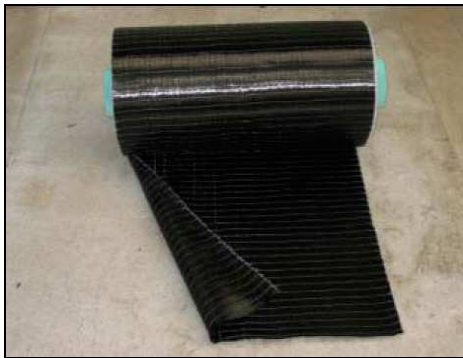


Figura 1.3: Tessuto in fibre di carbonio

A confronto con le fibre di vetro e con quelle aramidiche, le fibre di carbonio risultano essere le meno sensibili ai fenomeni di scorrimento viscoso (creep) e di fatica e sono contraddistinte da una modesta riduzione della resistenza a lungo termine.

Le fibre di vetro vengono prodotte per fusione, trafilatura e veloce raffreddamento di miscele di vari ossidi tra cui l'ossido di silicio, l'ossido di calcio, di boro, in funzione del tipo di applicazione e dell'ambiente in cui

dovrà operare. Esistono vari tipi di fibre con prestazioni molto diverse tra loro. Le più utilizzate sono il tipo E, più economiche ma con prestazioni meccaniche limitate, ed il tipo S, con prestazioni migliori ma decisamente più costose. Le fibre di vetro sono già da tempo comunemente usate in campo navale ed industriale per la fabbricazione di compositi con prestazioni medio-alte, ma stanno diventando molto popolari anche come barre di armatura principale nella costruzione di ponti ed altre strutture in calcestruzzo, in considerazione del loro minore costo rispetto alle fibre in carbonio. Si distinguono per la loro elevata resistenza, ma presentano un modulo di elasticità normale minore di quelle di carbonio o aramide. Un loro limite è la modesta resistenza all'abrasione, che richiede una certa cautela nelle operazioni di manipolazione durante la messa in opera.



Figura 1.4: Varie tipologie di nastri e tessuti in fibra di vetro

Le fibre in Aramide o Aramidiche sono fibre polimeriche ottenute per lavorazione di Poliammidi Aromatiche (in inglese ARomatic polyAMIDes) dalla cui contrazione deriva il nome "Aramid". Le prime fibre aramidiche prodotte risalgono agli anni '60 (1961) e sono state commercializzate con la denominazione di NOMEX. Nel 1971, nei laboratori della Dupont, gli stessi studiosi che avevano inventato Nomex hanno messo a punto e brevettato un processo per ottenere fibre aramidiche caratterizzate da prestazioni



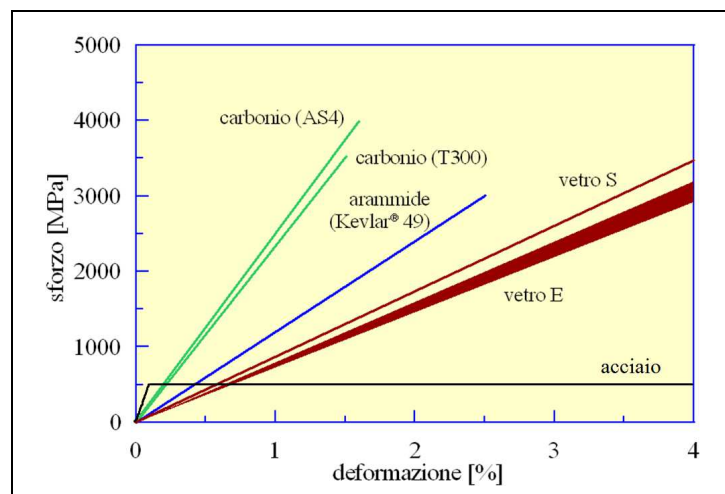
meccaniche decisamente superiori a quelle del Nomex e confrontabili con quelle di alcuni tipi di fibre in carbonio. Il materiale ottenuto è stato commercializzato con il nome di Kevlar® e rappresenta la quasi totalità delle fibre oggi utilizzate nei compositi a base aramidica.



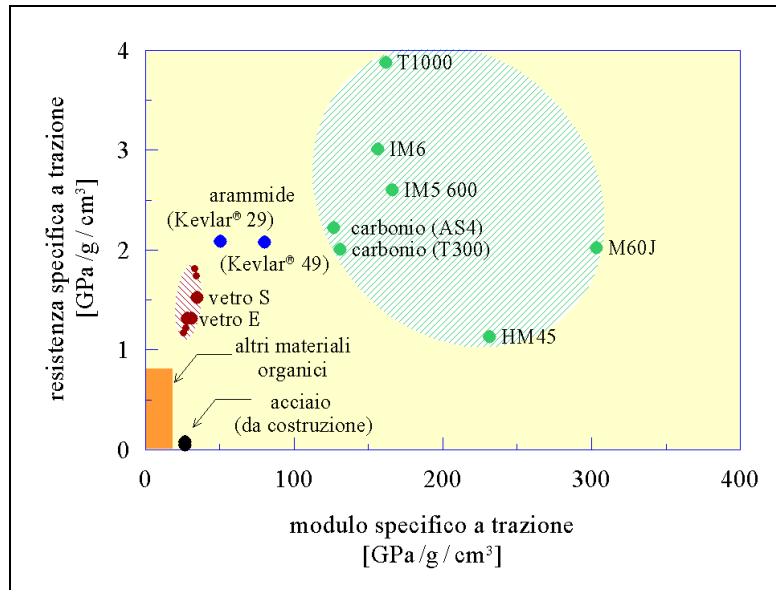
Figura 1.5: Nastro in tessuto Kevlar®

Il modulo di elasticità normale e la resistenza a trazione delle fibre di aramide sono intermedi tra quelli delle fibre di vetro e di carbonio, come illustrato nei grafici seguenti, in cui i valori del modulo e della resistenza sono rapportati alla densità (valori specifici).

Figura 1.6: Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo e l'acciaio



(a) comportamento a trazione monoassiale



(b) resistenza a trazione e modulo elastico

Le fibre di aramide trovano l'uso più appropriato nel restauro degli edifici in muratura, dove un modulo elastico particolarmente elevato non costituisce un'esigenza primaria e può, invece, rappresentare in alcuni casi un problema. Esse posseggono anche una grande resistenza all'impatto, molto utile nella realizzazione di particolari prodotti, come elmetti e giubbotti antiproiettile.

### 1.3 Le matrici

Le matrici più utilizzate per la fabbricazione dei compositi fibrorinforzati sono quelle polimeriche a base di resine termoindurenti.

Tali resine a temperatura ambiente si presentano liquide con consistenza pastosa e danno luogo, per successiva miscelazione con un opportuno reagente, detto hardner, ad un materiale solido vetroso (reticolazione). Essendo caratterizzate da una bassa viscosità allo stato fluido, consentono una relativa facilità di impregnazione delle fibre, quando utilizzate direttamente in cantiere per impregnare i tessuti e formare i compositi fibrorinforzati. Sono

inoltre dotate di ottime proprietà adesive e buona resistenza agli agenti chimici. Una volta lavorate a caldo induriscono permanentemente.

I principali svantaggi sono invece rappresentati dall'esigua ampiezza del campo di temperature di esercizio, limitato superiormente dalla temperatura di transizione vetrosa, dalla modesta tenacità a frattura (comportamento "fragile") e dalla sensibilità all'umidità in fase di applicazione sulla struttura.

Le resine termoindurenti più diffuse nel settore civile sono le epossidiche, ma sono anche impiegate le resine poliestere o vinilestere.

Sono anche disponibili materiali compositi fibrorinforzati con matrici polimeriche termoplastiche, che richiedono tecniche di applicazione diverse dalle precedenti.

A differenza delle termoindurenti, offrono una migliore tenacità e resistenza ai fattori ambientali. Principale differenza consiste nel fatto che possono essere riscaldate a temperature superiori alla temperatura di transizione vetrosa, senza che ciò provochi deterioramento delle loro caratteristiche meccaniche. Al contrario le termoindurenti, come già detto, diventano fragili e possono anche distruggersi se esposte oltre tale temperatura, peraltro generalmente più bassa di quella caratteristica dei materiali termoplastici.

Pertanto, mentre l'elevata viscosità posseduta a temperatura ambiente non consente l'utilizzo delle resine termoplastiche per impregnare i tessuti, molto promettente è invece il loro uso per la realizzazione di barre in FRP, da utilizzarsi come armatura del c.a. in sostituzione delle tradizionali barre di acciaio. Ciò per via della possibilità di ottenere in qualsiasi momento elementi piegati e staffe, mediante un opportuno trattamento termico.

Infine, risultano disponibili compositi fibrorinforzati che utilizzano come matrice resine elastomeriche con comportamento elastico e non fragile, caratterizzate da elevata tenacità ed elevato allungamento a rottura.

#### **1.4 Caratteristiche delle barre di FRP**

Le barre di FRP sono per forma simili a quelle in acciaio. Esistono in commercio barre con diverse sezioni rette (circolari, quadrate, cave, elicoidali) come illustrato nella figura 1.7.

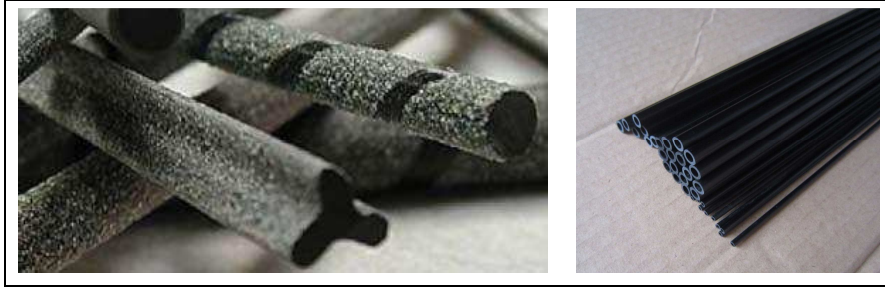


Figura 1.7: Diverse sezioni di barre

Esse sono prodotte principalmente per pultrusione, processo di produzione che garantisce allineamento e uniformità di distribuzione delle fibre, ma anche un alto tasso di rinforzo (espresso come percentuale di volume di fibre rispetto al volume totale).

La pultrusione è un processo continuo di produzione, che si articola essenzialmente in tre fasi:

- formatura
- impregnazione
- consolidamento.

Nella figura 1.8 è illustrato lo schema di funzionamento della pultrusione nella versione più comune, concepita per matrici termoindurenti con impregnazione a bagno di resina.

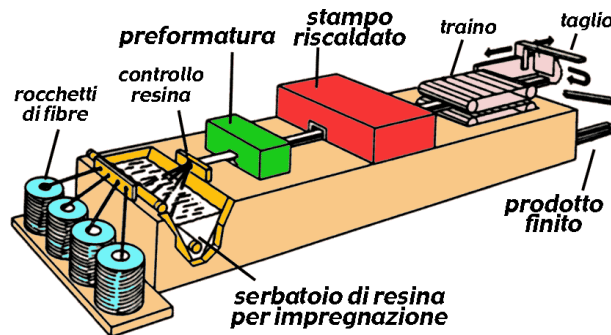


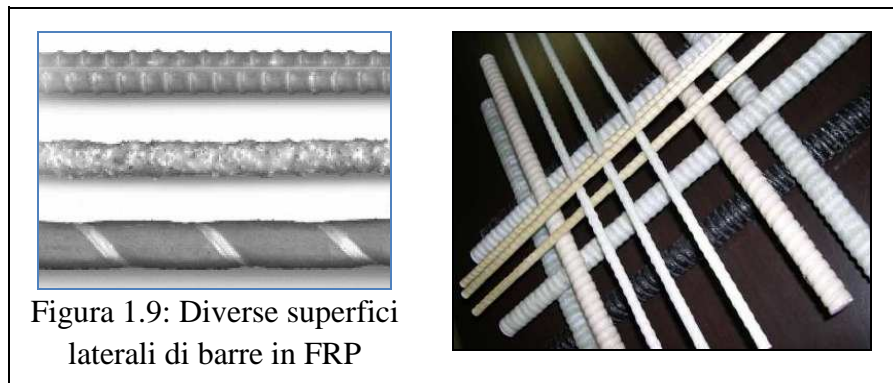
Figura 1.8: Schema di funzionamento della pultrusione

Le fibre sono prelevate da un gruppo di rocchetti e convogliate, attraverso rastrelliere che ne uniformano la disposizione (fase della formatura), verso un bagno di resina, dove avviene l'impregnazione. Il fascio di fibre impregnate entra quindi in uno stampo riscaldato (die), nel quale il materiale si consolida sotto pressione.

Durante questa fase i vuoti presenti tra le fibre sono eliminati, garantendo così la continuità del materiale in direzione trasversale.

Normalmente le barre disponibili in commercio presentano una percentuale volumetrica di fibra compresa tra il 50 ed il 70%.

Per ottenere una superficie scabra, che garantisca una maggiore aderenza con il calcestruzzo, le barre possono essere sottoposte a successive lavorazioni, consistenti principalmente nell'avvolgere filamenti di fibra in maniera elicoidale attorno alla sezione o smerigliando la sezione stessa, oppure ancora realizzando delle nervature in sola resina mediante stampaggio.



L'aderenza tra la barra ed il calcestruzzo circostante è garantita dall'insorgenza di una serie di tensioni interattive, che dipendono dalla superficie laterale della barra, dalle proprietà chimico-fisiche della superficie laterale e dalla classe di resistenza del calcestruzzo. Per caratterizzare il legame di aderenza bisognerebbe eseguire prove di *pull-out*, di cui il DT 203/2006 [2] fornisce le specifiche di esecuzione. Se si vuole ovviare all'esecuzione delle prove di caratterizzazione, nelle varie verifiche agli stati limite d'esercizio si devono soddisfare alcune limitazioni, attraverso l'introduzione di opportuni coefficienti che tengono conto in maniera forfettaria dell'aderenza tra calcestruzzo e barra in FRP.

Le proprietà meccaniche delle barre dipendono dal tipo di fibra e di resina, dalla quantità di fibra, dal diametro della barra e dal controllo qualitativo eseguito durante la fabbricazione.

Ma in generale, se le confrontiamo con l'acciaio, le barre in FRP posseggono un minor peso, un minor modulo di Young ed una maggiore resistenza a trazione.

Contrariamente all'acciaio, le barre in FRP raggiungono il loro limite di resistenza a trazione senza che il materiale manifesti alcuno snervamento. La curva tensione-deformazione che descrive il comportamento del materiale e che si può ottenere sottoponendo barre di tali materiali a prove di trazione diretta, fornisce per tutte le barre di FRP un comportamento elastico lineare fino a rottura, che avviene in maniera improvvisa (comportamento fragile) con completa assenza della fase di snervamento (figura 1.10).

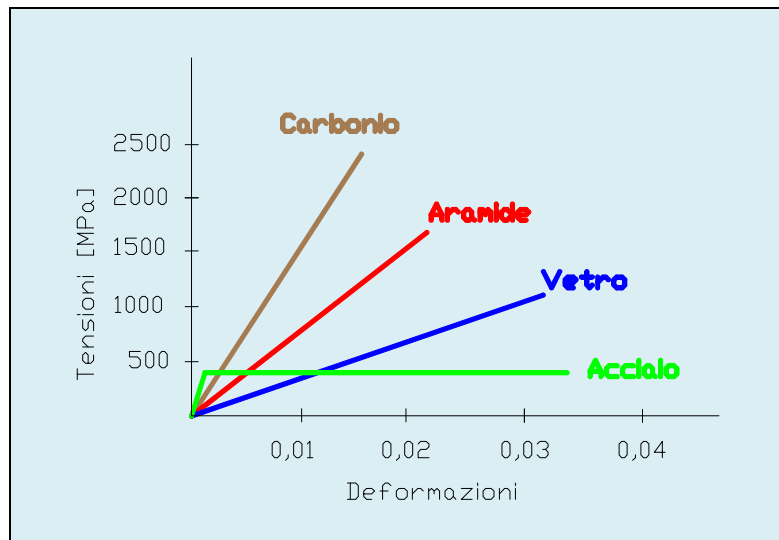


Figura 1.10: Confronto tra le curve caratteristiche di barre d'acciaio e di FRP

Come si può notare dalla stessa figura 1.10, il modulo di Young ( $E$ ) delle varie barre in FRP è sempre minore di quello dell'acciaio.

In particolare per il vetro, il modulo di Young è mediamente cinque o sei volte inferiore a quello delle barre in acciaio, pertanto, a parità di sforzo di

trazione, le barre di GFRP avranno in fase elastica un allungamento molto più grande di quello dell'acciaio.

Una seconda differenza rispetto alle tradizionali barre di acciaio è rappresentata dal fatto che la resistenza a trazione delle barre di FRP risulta essere funzione del diametro della barra.

A causa del ritardo con cui si trasmettono gli sforzi di taglio, infatti, le fibre più vicine al centro della sezione trasversale della barra non risultano sottoposte ad uno sforzo così elevato come quello che sopportano, invece, le fibre più vicine alla superficie esterna.

Questo fenomeno porta ad una diminuzione della resistenza e dell'efficienza nelle barre di grande diametro (size effect).

A conferma di ciò si possono esaminare le resistenze garantite a trazione per barre di GFRP, fornite dal produttore Hughes Brothers Inc. e riportate nella Tabella 1.1.

Tabella 1.1: Dati relativi alle proprietà meccaniche di barre di GFRP

Diametro della barra (mm)	Resistenza a trazione (MPa)	Modulo di elasticità (GPa)
6	830	40,8
9	760	40,8
12	690	40,8
16	655	40,8
19	620	40,8
22	585	40,8
25	550	40,8
28	520	40,8
32	480	40,8

Come si vede sempre dalla tabella 1.1, per il Modulo di elasticità delle barre si può assumere un valore costante, perché esso non varia significativamente con il diametro.

Per quanto invece riguarda gli elementi curvi, come staffe e ferri piegati, la resistenza risulta inferiore rispetto a quella degli elementi rettilinei,

principalmente a causa della elevata concentrazione di sforzi che si verifica nella porzione curva; ciò porta a valori della resistenza a trazione fino al 40-50% di quelli di una barra dritta.

Le barre di FRP hanno un peso specifico variabile tra 1,5 e 2,1 g/cm<sup>3</sup> e risultano, pertanto, molto più leggere (quattro o sei volte) dell'acciaio, che ha un peso specifico di 7,9 g/cm<sup>3</sup> (vedi Tabella 1.2).

Tabella 1.2: Valori tipici di peso specifico per barre di FRP e acciaio (g/cm<sup>3</sup>)

<b>CFRP</b>	<b>GFRP</b>	<b>AFRP</b>	<b>Acciaio</b>
1,50-1,60	1,25 ÷ 2,10	1,50 ÷ 1,60	1,25 ÷ 1,40

Tale proprietà diventa molto importante laddove è necessario contenere il peso proprio della struttura e determina inoltre sia una riduzione dei costi di trasporto che una più agevole movimentazione in cantiere.

Un ultimo aspetto che occorre considerare è rappresentato dal coefficiente di dilatazione termica delle barre in FRP, che risulta diverso a seconda che lo si misuri in direzione longitudinale oppure trasversale (rispettivamente  $\alpha_l$  e  $\alpha_t$ ) a causa dell'anisotropia del materiale. Tali valori sono strettamente correlati a quelli delle singole fasi che costituiscono il materiale ed in tabella 1.3 vengono riportati i valori tipici di tali coefficienti, per barre di composito con frazione volumetrica di fibre compresa tra il 50 ed il 70%.

Tabella 1.3: Coefficienti di dilatazione termica

<b>Barra</b>	$\alpha_l$ [10 <sup>-6</sup> / °C]	$\alpha_t$ [10 <sup>-6</sup> / °C]
<b>AFRP</b>	-6,0 ÷ -2,0	60,0 ÷ 80,0
<b>CFRP</b>	-2,0 ÷ 0,0	23,0 ÷ 32,0
<b>GFRP</b>	6,0 ÷ 10,0	21,0 ÷ 23,0



Per evitare la formazione di fessure nel calcestruzzo, a causa della dilatazione trasversale delle barre, è conveniente aumentare adeguatamente lo spessore del ricoprimento.

### **1.5 Applicazione dei materiali compositi FRP nell'Ingegneria Civile**

Nelle costruzioni civili l'impiego degli FRP copre principalmente due categorie di funzioni:

- rinforzo di elementi strutturali esistenti
- armatura di materiali tradizionali.

La prima categoria rappresenta sicuramente quella che ha conosciuto lo sviluppo più rapido.

Le cause che impongono interventi di rinforzo strutturale possono essere il degrado dei materiali nel tempo o cause esterne che hanno provocato danneggiamenti nella struttura (ad esempio eventi sismici, cedimenti di fondazione, incendi ecc.), ma anche una inadeguata progettazione dell'opera. Si pensi, ad esempio, a quanti edifici sono stati progettati per resistere solo a carichi verticali, essendo stati realizzati intorno agli anni '60, quando ancora non erano state emanate norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche.

In Italia, inoltre, tale necessità deriva anche dalla presenza di un ingente patrimonio di beni artistici e monumentali da salvaguardare. I recenti eventi luttuosi legati al sisma in Abruzzo, hanno reso estremamente e tristemente attuali queste problematiche legate alla necessità di eseguire rinforzi strutturali di adeguamento sismico, al fine di evitare danneggiamenti alle strutture e perdite di vite umane.

A fianco delle tecniche tradizionali si sono sviluppate tecniche più recenti che, sfruttando le elevate proprietà meccaniche dei materiali compositi, rappresentano un promettente campo operativo per il consolidamento ed il miglioramento e/o adeguamento sismico. Tali materiali consentono di eseguire sia sulle strutture di fondazione che di elevazione interventi, che, a differenza di quelli che utilizzano i materiali tradizionali, permettono di mantenere pressoché inalterate le dimensioni degli elementi precedenti.

Anche nel campo delle costruzioni artistiche e monumentali a struttura muraria, l'uso di FRP consente di realizzare interventi rapidi e poco invasivi, in armonia con i principi del restauro dei beni monumentali.

I rinforzi si realizzano tramite applicazione di nastri, reti o lamine.



Figura 1.11: Applicazione di nastro in CFRP sull'estradosso di una volta in muratura

Sono possibili anche interventi di cucitura e realizzazioni di chiodature tramite barre (Figura 1.12).



Figura 1.12: Cuciture e chiodature di una struttura muraria con barre di FRP

L'utilizzo degli FRP in tali interventi è stato consentito per la prima volta dall'O.P.C.M. n. 3274 del 20/03/2003 e succ. m.i. Per ultimo il D.M. 14/01/2008 [7] ha confermato la possibilità di utilizzare per le costruzioni esistenti materiali e prodotti non tradizionali, come gli FRP, nel rispetto di normative e documenti di comprovata validità, tra cui il Documento CNR-DT 200/2004, che costituisce un insieme coordinato di principi e regole applicative da utilizzare nel campo del rinforzo strutturale con FRP.

Per quanto invece riguarda le applicazioni strutturali dei materiali FRP come armatura di elementi in calcestruzzo cementizio, queste sono abbastanza numerose, ma soprattutto all'estero. La resistenza alla corrosione delle barre di FRP rende il loro impiego particolarmente vantaggioso nella realizzazione di solette di ponte. Ed è infatti in tal senso che l'utilizzo di tali barre si è maggiormente diffuso come armatura primaria in diversi ponti nel mondo.

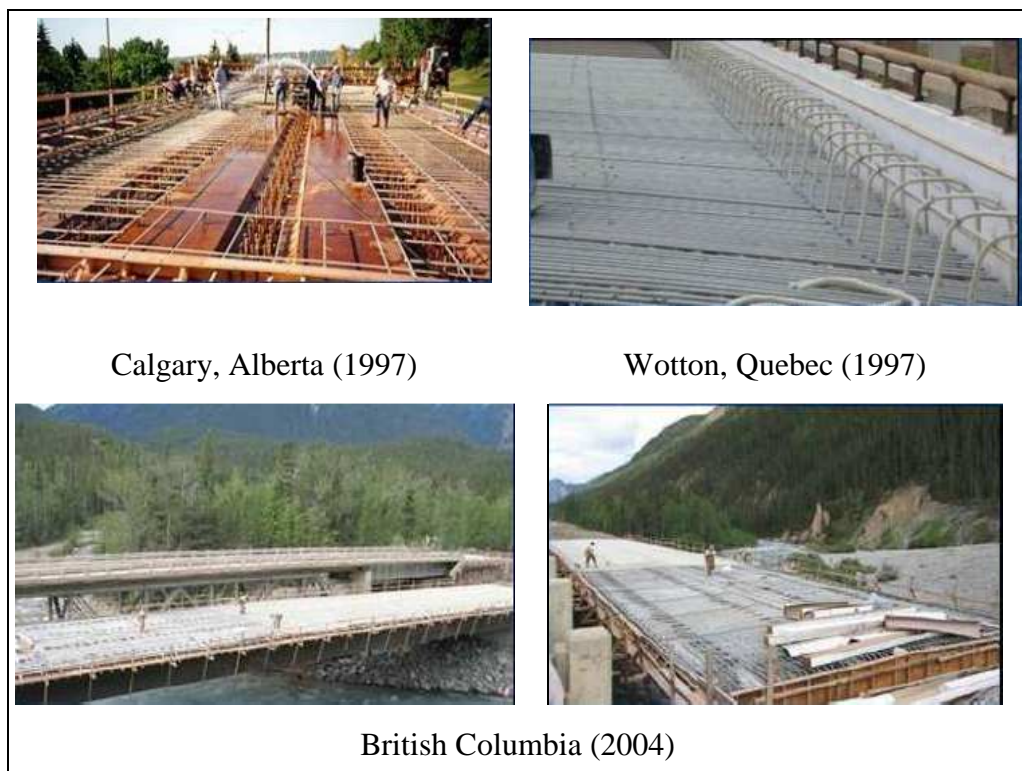


Figura 1.13: Costruzioni di impalcati da ponte in diverse parti del mondo

Esempi di tali strutture sono ormai datati, numerosi ed in crescente aumento, principalmente in Giappone, Cina, USA e Canada.

Ma anche le altre proprietà citate, non meno importanti, rendono attrattivo l'uso delle barre in FRP ed in particolare l'alta resistenza a trazione in ragione di un basso peso specifico, che incide sulla riduzione dei costi di trasporto e di movimentazione. Inoltre, la proprietà degli FRP di non interferire con i campi elettromagnetici può risultare risolutiva in alcuni ambiti speciali, come ad esempio nella realizzazione di sale ospedaliere, dove si devono evitare interferenze con le più moderne attrezzature per la risonanza magnetica e per la diagnostica ad immagini.



Figura 1.14: Centro traumatologico dell'ospedale "York" – USA

Tutte le caratteristiche descritte rendono le barre in FRP una promettente alternativa alle tradizionali barre di acciaio. Essendo le barre di FRP fabbricate con resine termoindurenti, presentano dei limiti di applicazione rispetto a quelle in acciaio, dovuti alla difficoltà di ottenere staffe o elementi curvi mediante piegatura. I pezzi sagomati, infatti, possono essere ottenuti solo per stampaggio in appositi impianti, con evidente limitazione nelle forme e nelle dimensioni e con inevitabili costi aggiuntivi. L'utilizzo delle resine termoplastiche, che possono essere piegate a caldo in qualsiasi momento, sta comunque introducendo nuove possibilità per ovviare a tali inconvenienti.

Un'altra problematica è legata al fatto che i modelli e gli approcci computazionali sviluppati nel corso degli anni per gli elementi armati con

barre di acciaio non sempre possono essere utilizzati direttamente nel caso di armature di FRP, a causa delle loro differenti proprietà meccaniche. Basta considerare, ad esempio, il diverso comportamento delle barre di FRP che, a differenza delle barre di acciaio, è sostanzialmente elastico-lineare fino a rottura con completa assenza della fase di snervamento. Ciò rappresenta un'importante discriminante tra le due tipologie di materiale, che deve tenersi in particolare conto nella progettazione antisismica, ed è anche il motivo per cui è stato necessario emanare specifiche istruzioni tecniche e linee guida [2]. Inoltre, le barre di FRP presentano una limitata resistenza al fuoco e alle alte temperature e un elevato costo iniziale, rispetto all'acciaio. Rispetto a quest'ultimo problema, però, bisogna notare che il maggiore costo iniziale del materiale è sicuramente compensato dalla drastica riduzione dei costi di manutenzione delle barre di FRP. Pertanto, considerando i costi dell'intera vita della struttura, si avrà anche in questo caso un ulteriore vantaggio. L'armatura in fibre di vetro (GFRP), ad esempio, sta guadagnando in popolarità rispetto a quella in fibre di carbonio (CFRP) per la costruzione di ponti e per altre strutture in calcestruzzo, grazie ai minori costi delle barre in GFRP rispetto a quelle in fibra di carbonio.

Esiste, infine, anche la possibilità di realizzare strutture interamente in composito, tramite la produzione di profili pultrusi, ossia elementi in profilo sottile di materiale composito ottenuti con la tecnica della pultrusione.

I profili possono poi essere assemblati per bullonatura o incollaggio mediante l'uso di resine epossidiche bicomponente. Tale categoria di opere rappresenta, però, un campo di applicazione marginale e destinato prevalentemente a scopi non strutturali.





Figura 1.15 : Esempi di realizzazioni con profilati in FRP

## CAPITOLO 2

### *Formulazione analitica del fenomeno del creep: Teoria di Findley*

#### **2.1 La durabilità dei materiali compositi**

L'uso crescente di materiali FRP come armatura nel calcestruzzo, in sostituzione delle barre in acciaio, deve essere supportato dalla conoscenza della durabilità ed affidabilità di tali materiali, cioè della capacità di mantenere inalterate nel tempo le loro prestazioni iniziali.

Sicuramente l'alta durabilità degli FRP è oggi ben nota in relazione ai fenomeni corrosivi, che, al contrario, influenzano decisamente la vita utile delle strutture in calcestruzzo armato con barre di acciaio. Ma gli altri aspetti della durabilità, di cui verrà in seguito discusso, non sono stati ancora sufficientemente investigati, soprattutto con riferimento agli FRP di ultima generazione.

La durabilità degli FRP non è, però, un tema facile da affrontare, poiché il danneggiamento del materiale dipende sia dal comportamento delle fibre che della matrice, ma anche dal legame di adesione che si verifica sull'interfaccia resina-fibra. Tutti e tre gli elementi giocano un loro ruolo nella definizione delle caratteristiche del materiale composito e le loro singole prestazioni devono essere garantite durante tutta la vita di progetto della struttura.

La matrice protegge le fibre e trasferisce le forze uniformemente tra le stesse, perciò il tipo e la qualità della fibra giocano un ruolo fondamentale. La qualità della resina dipende dall'assenza di difetti e dalla continuità della superficie. Per esempio i tagli che si eseguono sulle barre espongono direttamente le fibre in quella sezione all'ambiente esterno e ciò può provocare effetti indesiderati da un punto di vista della durabilità e danneggiamenti che si propagano dalla regione di taglio a tutta la lunghezza della barra.

Le caratteristiche delle resine che potrebbero aumentare la durabilità dei materiali FRP, indipendentemente dalla resina e dal tipo di fibra, sono:

- buon ricoprimento delle fibre con la resina;
- assenza di difetti, sia sulla superficie che nello spessore;
- assenza di vuoti;
- grado di cura del processo (una mancanza di controllo del processo non garantisce un buon legame trasversale tra fibra e matrice).

Le fibre garantiscono la rigidità e la resistenza del materiale composito, così che le prestazioni della struttura dipendono dalle loro principali caratteristiche meccaniche e dalla loro durabilità. In generale le fibre di vetro, che sono usate come armatura del calcestruzzo grazie al loro minore costo rispetto al carbonio, sono però anche più sensibili agli ambienti alcalini come quello cementizio, rispetto a quelle di carbonio o aramide.

La durabilità di un materiale composito FRP dipende, come già detto, non solo dalle proprietà dei materiali che lo costituiscono (matrice e fibre), ma anche dall'integrità dell'interfaccia tra i due componenti.

Risulta, pertanto, necessario avere una forte (solida) interfaccia fibra/matrice, poichè il deterioramento di questa interfaccia riduce la capacità di trasferimento degli sforzi tra le fibre, con una conseguente debolezza del materiale composito.

Le osservazioni appena fatte sono alla base di una continua revisione dei processi di realizzazione degli FRP, in considerazione del fatto che il miglioramento delle prestazioni si può ottenere anche ottimizzando le tecnologie ed usando resine di tipo diverso.

I principali fattori che vengono riconosciuti come causa di riduzione della durabilità degli FRP sono: il deterioramento dovuto ai fattori ambientali e la riduzione delle proprietà meccaniche per effetto di carichi significativi prolungati nel tempo.



Le attuali linee guida disponibili in campo internazionale consentono di tener conto degli effetti negativi dovuti alle condizioni ambientali ed ai carichi sostenuti in maniera forfettaria, attraverso l'introduzione di opportuni fattori riduttivi delle tensioni di progetto. Di seguito nella tabella 2.1 viene riportato un confronto tra le disposizioni indicate a tal riguardo dalle più rappresentative linee guida internazionali, precisamente quelle rilasciate negli USA dall'American Concrete Institute [5] ed in Italia dal CNR [2].

Tabella 2.1: Coefficienti di riduzione della resistenza a trazione

Fibra	Fattori ambientali		Carichi di lunga durata	
	ACI 440	CNR	ACI 440	CNR
Carbonio	0.85÷0.95	0.90÷1.00	0.55	0.90
Aramide	0.70÷0.85	0.80÷0.90	0.30	0.50
Vetro	0.50÷0.75	0.70÷0.80	0.20	0.30

L'uso di coefficienti di riduzione può essere una semplice soluzione per superare le difficoltà dovute all'assenza di dati consolidati e specifici per ogni tipo di materiale sulla durabilità degli FRP; tale assenza di dati di riferimento è confermata anche dalle differenti valutazioni dei coefficienti suggerite dalle due norme.

Tali coefficienti, per di più, quando applicati entrambi (fattori ambientali e carichi prolungati) riducono notevolmente il campo di applicazione, non consentendo di sfruttare a pieno le proprietà superiori degli FRP di nuova generazione, che certamente non possono essere così vulnerabili come i loro predecessori agli effetti ambientali ed ai carichi di lunga durata. Infatti tali coefficienti sono troppo cautelativi e sono criticati da molti esperti perché sono basati sul comportamento dei prodotti FRP di prima generazione, che erano di minore qualità, e su dati limitati sul loro comportamento a lungo termine. Da qui si motiva l'interesse ad indagare sul comportamento reologico dei compositi FRP utilizzati nell'Ingegneria Civile.

Tra i fenomeni che possono influenzare la durabilità dei materiali compositi fibrorinforzati verrà dedicata attenzione al fenomeno del creep.

## 2.2 Il fenomeno del creep

I materiali viscoelastici, com'è possibile comprendere dalla stessa denominazione, combinano le caratteristiche dei solidi elastici e quelle dei fluidi viscosi, presentando un comportamento intermedio tra i due. Il comportamento viscoelastico è tipico dei polimeri ed è dovuto alla natura stessa del legame molecolare, che è causa di una naturale tendenza allo scorrimento, anche sotto l'azione di un carico costante. La velocità di scorrimento dipende sia dalla natura chimica dei polimeri, che dalla temperatura.

Un materiale viscoelastico è spesso detto materiale dotato di “memoria”, perché il comportamento di tali materiali dipende non soltanto dalle condizioni correnti di carico, ma anche dall'intera storia di carico manifestatasi fino a quel momento. La reologia è la scienza che ne studia il comportamento.

Caratteristica dei materiali viscoelastici è lo *scorrimento viscoso* (creep), ovvero l'aumento di deformazione nel tempo per effetto di una forza costante applicata ed il *rilassamento delle tensioni* nel caso di una deformazione imposta.

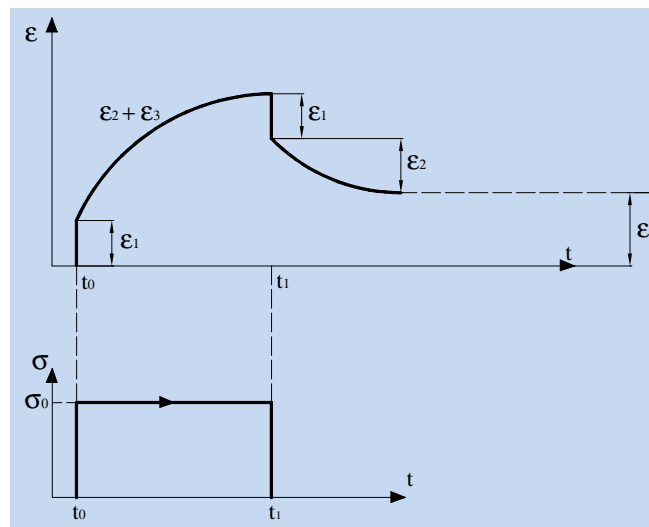


Figura 2.1: Comportamento a creep di un materiale viscoelastico

La fig. 2.1 mostra l'andamento nel tempo delle deformazioni di un materiale viscoelastico sottoposto ad una prova di creep e successivo scarico, secondo la seguente legge di carico: applicazione istantanea di una tensione  $\sigma_0$ , che viene mantenuta costante nell'intervallo di tempo  $(t_0, t_1)$  e poi riportata a zero. Nel diagramma  $(\epsilon, t)$  osserviamo che la deformazione totale è somma di tre componenti proporzionali al carico:  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$  rappresentano, rispettivamente, la deformazione elastica istantanea e ritardata, mentre  $\epsilon_3$  è la deformazione permanente non recuperabile e dovuta al creep.

### 2.2.1 Modelli viscoelastici elementari: il Modello di Maxwell

I solidi elastici hanno la caratteristica di avere una forma propria, si deformano se sottoposti ad un carico esterno, ma non appena cessa l'azione delle forze esterne ritornano alla forma iniziale. Per essi vale la legge di Hooke:

$$\sigma = E \epsilon \quad (2.1)$$

che lega lo sforzo alla deformazione, descrivendo il *legame costitutivo* di tali materiali.

I liquidi, al contrario, non hanno una forma propria, quindi gli sforzi interni non dipendono dalla deformazione, proprio perché non esiste una forma di riferimento, ma dipendono dalla velocità di cambiamento della forma, ovvero dalla velocità di deformazione (gradiente di velocità).

Per i liquidi vale la Legge di Newton:

$$\sigma = \eta \dot{\epsilon} \quad (2.2)$$

che lega tensione e gradiente di velocità tramite la costante  $\eta$  (viscosità).

Per descrivere le caratteristiche dei materiali che esibiscono un comportamento viscoelastico lineare da un punto di vista monodimensionale esistono modelli elementari basati su analogie meccaniche, ottenuti accoppiando in serie ed in parallelo molle elastiche e dissipatori viscosi.

Tra questi, il modello di fig. 2.2 che accoppia in serie una molla (di rigidezza  $E$ ) ed un ammortizzatore viscoso (di rigidezza  $\eta$ ), è noto come *modello di Maxwell*.

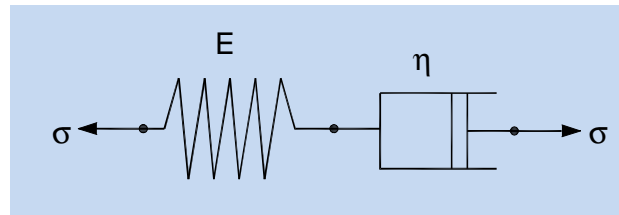


Figura 2.2: Modello di Maxwell

La deformazione al generico istante  $t$  è data dalla somma della deformazione della molla e di quella dell'ammortizzatore.

Indicando con  $\varepsilon$  la deformazione al generico istante  $t$  del modello di Maxwell e con  $\varepsilon_S$  e  $\varepsilon_D$ , rispettivamente, quelle della molla e dell'ammortizzatore, risulta:

$$\varepsilon = \varepsilon_S + \varepsilon_D \quad (2.3)$$

da cui, derivando rispetto al tempo, si ottiene:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_S + \dot{\varepsilon}_D \quad (2.4)$$

Sostituendo nella (2.4), le (2.1) e (2.2), si ottiene:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.5)$$

La (2.5) rappresenta l'equazione differenziale che descrive il comportamento di un materiale viscoelastico interpretato con il Modello di Maxwell.

Sottoponiamo il materiale ad una prova di creep, in cui la tensione viene istantaneamente portata al valore  $\sigma_0$  e poi mantenuta costante nel tempo (fig. 2.3).

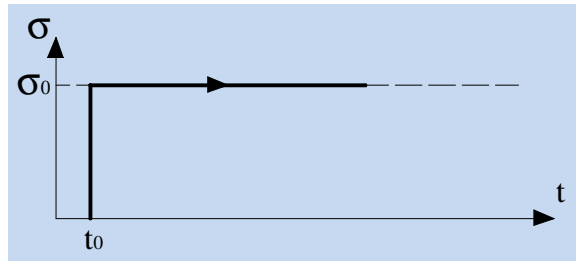


Figura 2.3: Prova di creep

Dalla (2.5) si ricava che il fenomeno esaminato è descritto dall'equazione differenziale del primo ordine:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\eta} \quad (2.6)$$

che, integrata con la condizione iniziale:

$$\varepsilon(t = t_0) = \frac{\sigma_0}{E} \quad (2.7)$$

essendo nulla all'istante  $t_0$  la deformazione del dissipatore, fornisce il legame costitutivo del modello di Maxwell, che si traduce nella seguente relazione:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left[ 1 + \frac{E}{\eta} (t - t_0) \right] \quad (2.8)$$

Indicando con:

$$t_r = \frac{\eta}{E} = \text{tempo di ritardo} \quad (2.9)$$

si ricava in definitiva:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left[ 1 + \frac{1}{t_r} (t - t_0) \right] \quad (2.10)$$

Il grafico della relazione (2.10) è rappresentato nella Figura 2.4, dalla quale si evince che un materiale di Maxwell esibisce inizialmente una deformabilità

pari ad  $1/E$ ; poi la deformazione cresce nel tempo con legge lineare di coefficiente angolare pari a  $\frac{\sigma_0}{E t_r}$ .

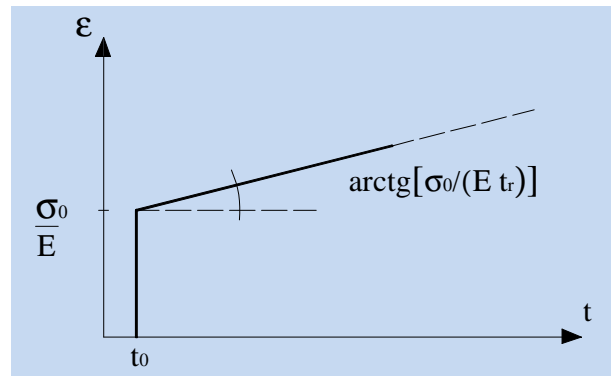


Figura 2.4: Legame costitutivo viscoelastico secondo il modello di Maxwell

Ipotizziamo di sottoporre il modello di Maxwell alla legge di carico di fig. 2.5 a), ottenibile per sovrapposizione delle due di fig. 2.5 b) e 2.5 c): la tensione è portata istantaneamente al valore  $\sigma_0$  all'istante  $t = t_0$ , poi mantenuta costante nell'intervallo  $(t_0, t_1)$  ed all'istante  $t_1$  istantaneamente azzerata.

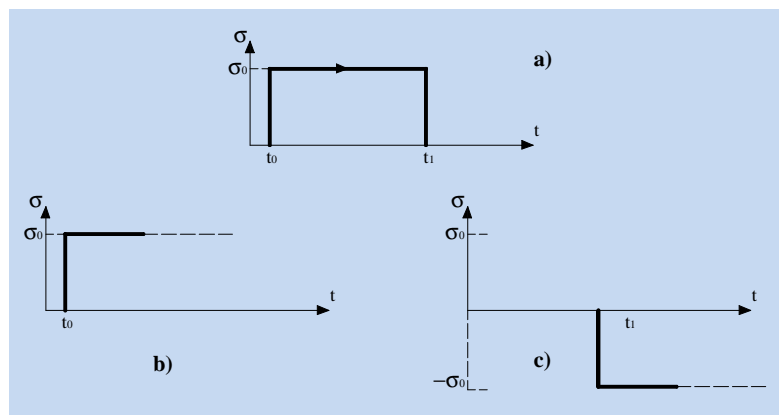


Figura 2.5: Legge di carico

Considerata la linearità della (2.10) la risposta del materiale alla legge di carico indicata nella fig. (2.5) si può ottenere per sovrapposizione degli effetti. In particolare per  $t > t_1$  risulta:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left[ 1 + \frac{1}{t_r} (t - t_0) \right] - \frac{\sigma_0}{E} \left[ 1 + \frac{1}{t_r} (t - t_1) \right] = \frac{\sigma_0}{Et_r} (t_1 - t_0) \quad \text{per } t > t_1 \quad (2.11)$$

Il grafico della (2.11) è rappresentato nella fig. 2.6

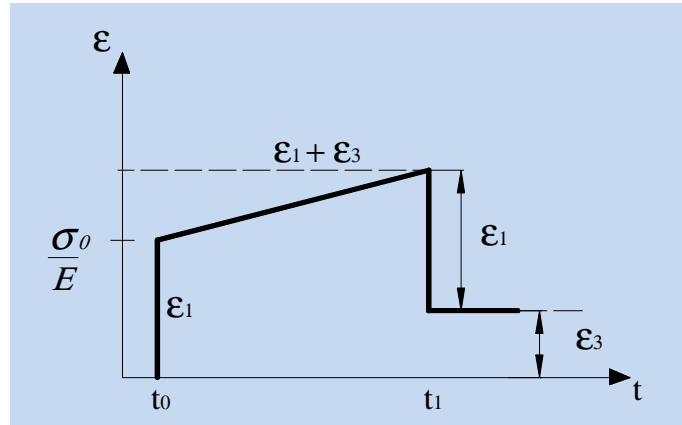


Figura 2.6: Comportamento del modello di Maxwell ad una prova di creep con scarico

In questo caso la deformazione è somma di due termini:

$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E}$  che rappresenta la deformazione elastica iniziale e che viene

interamente recuperata all'istante  $t_1$  di scarico, ed  $\varepsilon_3 = \frac{\sigma_0}{Et_r} (t_1 - t_0)$  che

rappresenta la deformazione viscoelastica, che residua allo scarico.

Dal grafico di fig. 2.6 si evince allora che il modello di Maxwell riproduce il fenomeno della elasticità istantanea, ma non quello della elasticità ritardata (cfr. fig. 2.1). Tutta la deformazione viscosa si tramuta in deformazione residua: in altri termini tutta la deformazione viscoelastica è irreversibile.

Il modello di Maxwell interpreta bene il comportamento viscoso dei materiali polimerici a struttura amorfa senza legami chimici tra le molecole.

### 2.3 Il creep nei materiali compositi FRP

Anche i materiali compositi FRP esibiscono un comportamento viscoso (connesso sostanzialmente alle proprietà viscoso della resina polimerica che costituisce la matrice) che può pregiudicare nel tempo le loro caratteristiche meccaniche iniziali. Il fenomeno può essere visto come una riduzione nel tempo del modulo di Young del materiale.

Tale comportamento si evidenzia sottoponendo il materiale in esame a prove di creep, ossia a prove di trazione assiale, condotte per prefissati valori della temperatura, con carico applicato istantaneamente e poi mantenuto costante.

Se si fa riferimento al caratteristico diagramma ( $\epsilon, t$ ) di una tipica prova di creep (Figura 2.7), si osserva una deformazione elastica istantanea, successivamente una fase nella quale la deformazione cresce velocemente (nota come creep primario), a cui segue una ulteriore fase (detta creep secondario) nella quale l'incremento di deformazione nel tempo, ossia la velocità di creep, è pressoché costante. Per valori elevati della tensione si può arrivare (in una fase detta di creep terziario) alla rottura del provino.

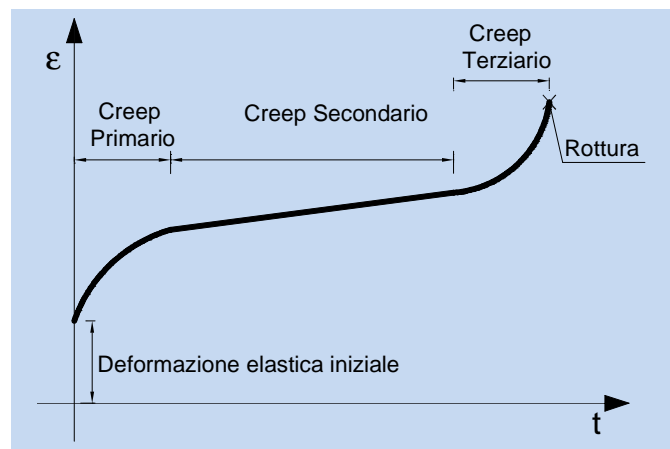


Figura 2.7: Tipico andamento delle deformazioni assiali in una prova di creep



La formulazione matematica generale del tasso di creep ha la seguente forma:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = F(\sigma, T) \quad \text{dove:} \quad (2.13)$$

$\varepsilon$  è la deformazione da creep,  $t$  il tempo,  $T$  la temperatura e  $\sigma$  la tensione.

La relazione (2.13) indica come la variazione nel tempo della deformazione da creep sia funzione della tensione e della temperatura.

Come già accennato nel paragrafo 2.1, anche il creep, che rientra tra i comportamenti a lungo termine che caratterizzano la durabilità e l'affidabilità di un materiale, dipende dalle caratteristiche di entrambi i materiali che costituiscono il composito.

Nel caso dei materiali compositi, quindi,  $F$  è funzione delle tensioni prodotte in entrambi i componenti, pertanto la resistenza al creep dipenderà dalla resistenza dei singoli componenti. In particolare, la deformazione da creep del componente a resistenza minore (la matrice) sarà controllata dal materiale a resistenza maggiore (la fibra). Ne consegue che una maggiore adesione tra i due componenti potrebbe anche comportare una resistenza maggiore di quella manifestata dai singoli componenti.

Per tutto quanto detto appare evidente, quindi, che il creep nei materiali polimerici compositi dipenda dai seguenti fattori:

- tipo di matrice;
- tipo di fibra, percentuale volumetrica e orientamento delle stesse;
- storia di carico;
- temperatura e umidità.

Essendo le fibre meno sensibili ai fenomeni viscosi di quanto non lo sia la matrice polimerica, un elevato contenuto in volume di fibre limita, in maniera più o meno sensibile a seconda del tipo di fibra, la deformazione a lungo termine del composito. Per quanto riguarda le fibre, abbiamo già visto nel paragrafo 1.2 che quelle in carbonio, rispetto al vetro ed all'aramide, sono le meno sensibili al fenomeno del creep.

Oltre che dalla composizione chimico-fisica delle fibre e dalla natura della matrice, il comportamento a creep degli FRP è influenzato anche da fattori di tipo ambientale, come la temperatura e l'umidità. In particolare la temperatura

esalta i fenomeni viscosi, quanto più i valori di temperatura sono prossimi a quelli di transizione vetrosa della matrice.

Le deformazioni da creep dipendono, inoltre, anche dal livello delle tensioni mobilitate in condizioni di esercizio e dalla “storia di carico” precedente. Oltre a ciò, anche la direzione di applicazione del carico stesso, influisce sulla risposta, trattandosi di un materiale anisotropo per la presenza delle fibre lunghe di rinforzo.

#### 2.4 L'equazione di Findley

Per descrivere la risposta viscoelastica di un elemento in FRP, dovuta alle proprietà viscosi della matrice polimerica, esistono in letteratura semplici modelli di natura sperimentale, tra i quali figura quello dovuto al lavoro originario di Findley (1960), che lo ha poi aggiornato nel 1987 [9] e che è stato validato da diverse esperienze [13, 19, 20].

Secondo tale formulazione, la deformazione assiale al generico istante  $t$  in una prova di creep con carico costante applicato al tempo  $t=0$  si ottiene dall'equazione:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + m t^n \quad (2.14)$$

Il grafico dell'equazione (2.14) è riportato in figura 2.8.

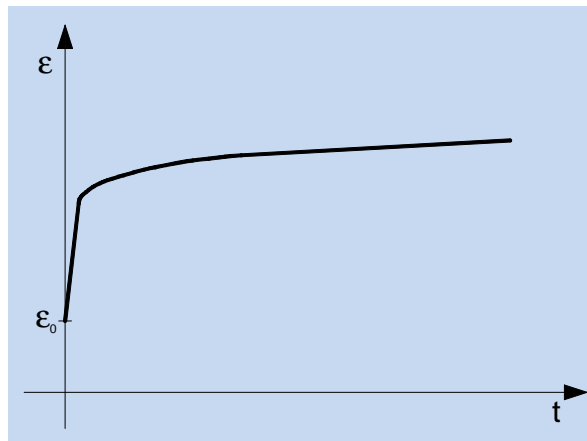


Figura 2.8: Risposta di un materiale di Findley ad una prova di creep

Nella (2.14) la deformazione totale  $\varepsilon(t)$  è espressa come somma di due contributi: la deformazione elastica istantanea  $\varepsilon_0$  e quella da creep (variabile nel tempo), che Findley esprime con una “legge di potenza” in funzione di due parametri “m” ed “n”, detti appunto *parametri di Findley*.  $\varepsilon_0$  ed “m” dipendono sia dalla temperatura che dallo stato tensionale, mentre “n” è un coefficiente del materiale che si assume indipendente dallo stato tensionale.

I coefficienti del modello proposto si possono determinare per il materiale considerato attraverso prove di creep eseguite per diversi valori della temperatura e del carico di trazione applicato.

Il limite di questa formulazione empirica è che essa non consente di descrivere il comportamento del materiale con programmi di carico più generali di quello a “carico costante”, compresa la fase di scarico e recupero della deformazione, com'è possibile fare con i modelli meccanici tipo il Modello di Maxwell descritto al paragrafo 2.2.1.

Già numerose esperienze in letteratura hanno dimostrato l'idoneità di tale modello a descrivere il comportamento a creep degli FRP, se pur con riferimento a laminati, piatti, angolari.

Gli esperimenti condotti nell'ambito della presente ricerca hanno dimostrato, come verrà di seguito meglio illustrato, che anche per le barre in composito fibro-rinforzato studiate tale equazione è appropriata a descriverne il comportamento viscoelastico, quando le barre sono soggette ad un carico di trazione costante, applicato in direzione longitudinale.



## CAPITOLO 3

### *Attrezzature e procedura sperimentale*

#### **3.1 Materiali**

Nella presente sperimentazione si é focalizzata l'attenzione sulle barre di composito in fibra di vetro (GFRP).

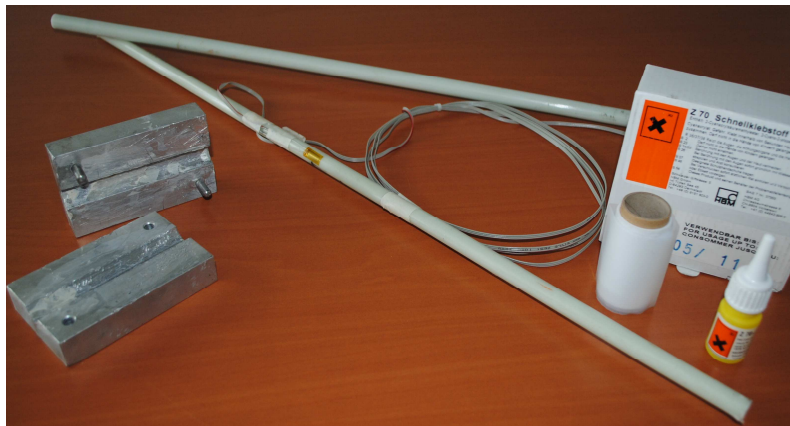


Figura 3.1: Barre di GFRP ed attrezzature

Sono state utilizzate barre commerciali a media resistenza e medio modulo elastico, a sezione circolare piena di diametro pari a 14 mm, con fibre di vetro

lunghe unidirezionali, immerse in una resina vinilestere termoindurente. Le barre sono realizzate per pultrusione, processo di produzione che garantisce allineamento e uniformità di distribuzione delle fibre, ma anche un'alta percentuale in volume di fibre rispetto al volume totale.

La superficie laterale delle barre è piuttosto liscia, mentre per un loro utilizzo come armatura nel calcestruzzo è auspicabile che la superficie venga trattata per essere scabra e garantire, quindi, una maggiore adesione con il calcestruzzo stesso. Inoltre esse sono poco resistenti all'abrasione superficiale ed è stato perciò necessario usare sempre una certa cautela durante il loro utilizzo. In Tabella 3.1 sono indicate le caratteristiche meccaniche delle barre fornite dalla casa produttrice.

Tabella 3.1: Caratteristiche tecniche delle barre

<b>Caratteristiche</b>	<b>Barre di GFRP</b>
Diametro	14 mm
Peso specifico	1.9 g/cm <sup>3</sup>
Contenuto in fibre	70%
Allungamento a rottura a trazione	4.5%
Modulo elastico a trazione	40 GPa
Resistenza a trazione	1000 MPa
Temperatura limite di esercizio	-30 / +70 °C
Colore	chiaro

Allo scopo di verificare la resistenza a trazione dichiarata nella documentazione tecnica relativa al prodotto, sono state eseguite anche prove di caratterizzazione meccanica, consistenti in prove di trazione diretta.

### 3.2 Attrezzature

Per l'esecuzione delle prove di creep e di trazione si è fatto riferimento alle indicazioni fornite dalle CNR DT203/2006 [2] ed ACI 440-3R [4].

La superficie laterale abbastanza liscia delle barre di GFRP testate condiziona pesantemente il successo delle prove medesime. Ed infatti è stato necessario dedicare una prima fase iniziale della ricerca all'individuazione di un dispositivo di afferraggio delle barre alla macchina di prova, che consentisse di condurre i test senza che si verificasse slittamento reciproco tra afferraggi, barra e ganasce della macchina di prova.

Entrambe le norme citate suggeriscono per l'esecuzione di prove di caratterizzazione meccanica delle barre l'utilizzo di dispositivi di ancoraggio da realizzarsi tramite tubolari in acciaio, con le caratteristiche di cui alle figure 3.2 a e b.

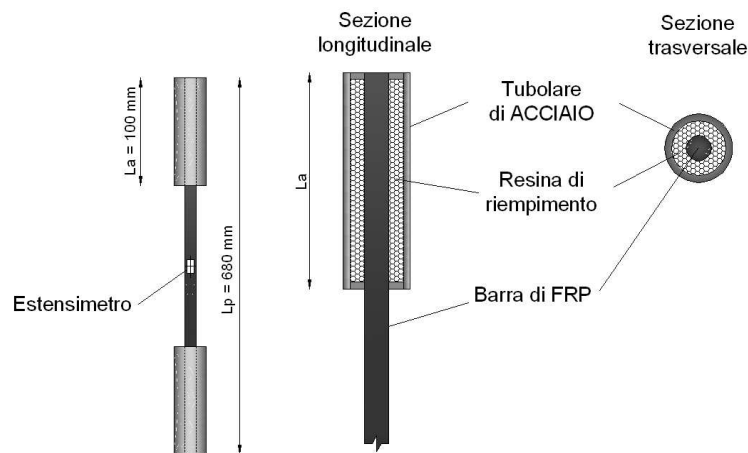


Figura 3.2 a: Afferraggio delle barre di FRP proposto dal CNR DT 203/2006

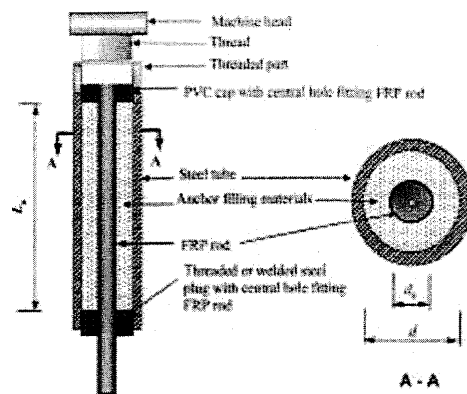


Figura 3.2 b: Afferraggio delle barre di FRP proposto dalle ACI 440.3R-04

In una fase iniziale della sperimentazione sono stati adoperati elementi tubolari di acciaio (Figura 3.3), così come suggerito dalle norme citate [2-4], ma la notevole rigidità di tali elementi consentiva lo scorrimento delle barre di FRP all'interno degli stessi afferraggi.

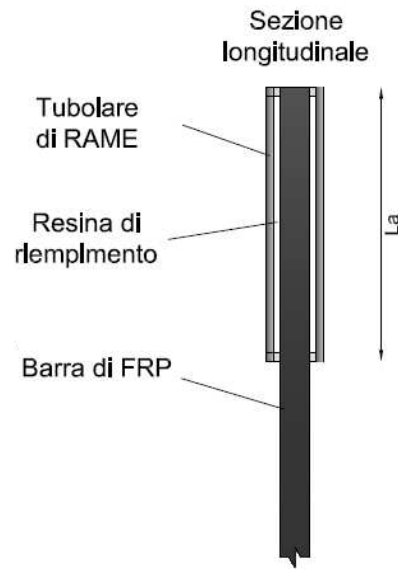


Figura 3.3: Afferraggio delle barre di FRP in tubolari di acciaio

Si è provato quindi ad utilizzare degli elementi tubolari (Figura 3.4) delle stesse caratteristiche e dimensioni, ma realizzati in rame piuttosto che in



acciaio, incollati alle due estremità della barra con delle resine. Essendo il rame più deformabile, sembrava adattarsi meglio al sistema di afferraggio della macchina di prova.



Figura 3.4: Afferraggio delle barre di FRP in tubolari di rame

Dopo diversi tentativi è stato verificato che i risultati migliori si ottenevano utilizzando degli ancoraggi in alluminio, che sono stati allo scopo progettati e successivamente utilizzati per tutto lo svolgimento della sperimentazione (Figura 3.5). Tali ancoraggi meglio di tutti gli altri garantivano aderenza con la barra testata e con le ganasce della macchina di prova, impedendone lo scorrimento e garantendo una corretta sollecitazione a trazione delle barre. Essi sono realizzati in alluminio e presentano sezione parallelepipedica cava e scabra, sia all'interno (nella parte circolare di alloggiamento della barra) che sulla superficie piana esterna. Sempre per migliorare l'aderenza, l'ancoraggio è dotato di pioli in alluminio che consentono un ulteriore incastro delle due metà, che, prima dell'inserimento della barra, vengono cosparse di sabbia e di adesivo (Figura 3.6).

Le due metà vengono poi incollate tra di loro ed alle estremità della barra con lo stesso adesivo utilizzato per l'incollaggio degli estensimetri, di seguito descritto (Figura 3.10).

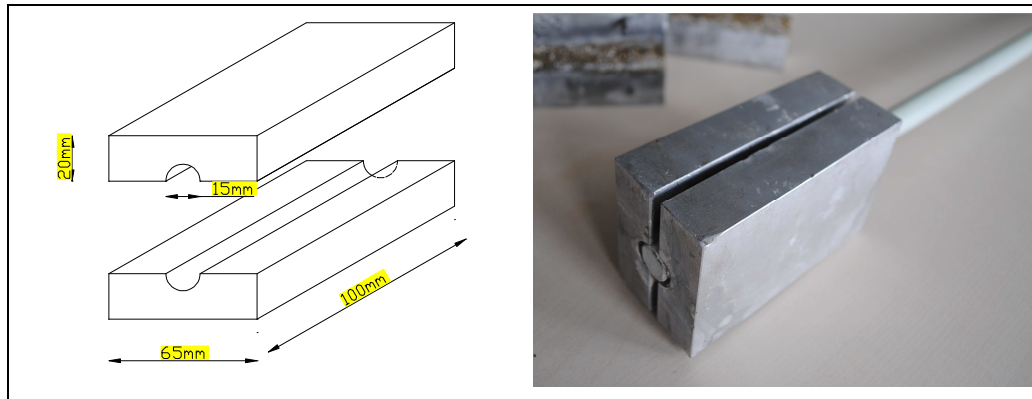


Figura 3.5: Particolari e dimensioni dell'afferraggio in alluminio a sezione parallelepipedica cava

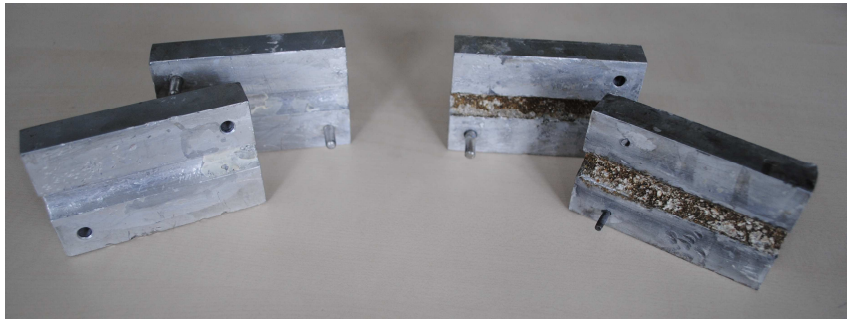


Figura 3.6: Particolare della superficie interna dell'afferraggio  
a) non sabbiata                      b) sabbiata

La realizzazione di un idoneo dispositivo di afferraggio è necessaria per garantire l'assenza di scorrimenti, ma anche per assicurare che la direzione del carico applicato sia il più possibile coincidente con l'asse longitudinale del provino. Ciò consente di sottoporre correttamente il provino a sforzi assiali di trazione, assicurando altresì che gli sforzi nella sezione caricata del provino possano considerarsi come uniformemente distribuiti nelle sezioni trasversali, perpendicolari, cioè, alla direzione di applicazione del carico.

La preparazione dei provini, ricavati da barre lunghe 2 metri, è stata eseguita sempre secondo quanto riportato in [2-4]. In particolare, con riferimento alla Figura 3.2, la lunghezza  $L_p$  del provino deve soddisfare i seguenti requisiti:

$$L_p \geq 100 + 2 \cdot L_a; L_p \geq 40 \cdot d_b + 2 \cdot L_a \text{ [lunghezze in mm]},$$

essendo  $L_a$  e  $d_b$ , rispettivamente, la lunghezza di afferraggio ed il diametro della barra.

La rottura dei provini deve avvenire nella zona di lunghezza  $L_p - 2 \cdot L_a$ .

Per la lettura delle deformazioni si sono adoperati estensimetri elettrici (strain gages) del tipo a variazione di resistenza (Figura 3.7)

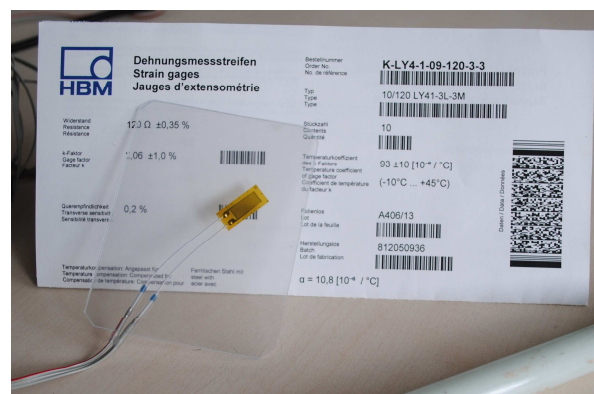


Figura 3.7: Estensimetri usati

con le seguenti caratteristiche:

Base di misura	10 mm
Resistenza nominale	120 $\Omega \pm 0,35\%$
Gage factor (fattore di taratura K)	2,06 $\pm 1,0\%$
Fattore di sensibilità trasversale	0,2%

Per tener conto degli effetti deformativi dovuti alla variazione di temperatura, il fornitore mette a disposizione una curva di graduazione, con relativo polinomio interpolante, che consente di effettuare correzioni, laddove le variazioni termiche dovessero risultare significative.

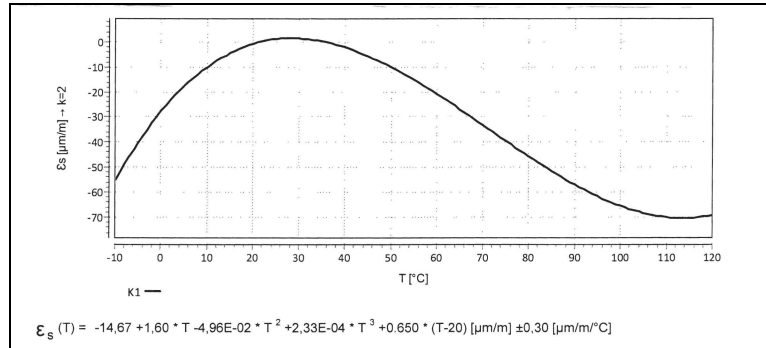


Figura 3.8: Curva ( $\epsilon_s, T$ ) di graduazione dell'estensimetro

Gli estensimetri sono stati incollati nella sezione centrale dei provini (figura 3.9) mediante un collante monocomponente, fluido, indurente a freddo (cianoacrilato) (figura 3.10), previa accurata preparazione della superficie delle barre, secondo le indicazioni fornite dalla casa costruttrice.

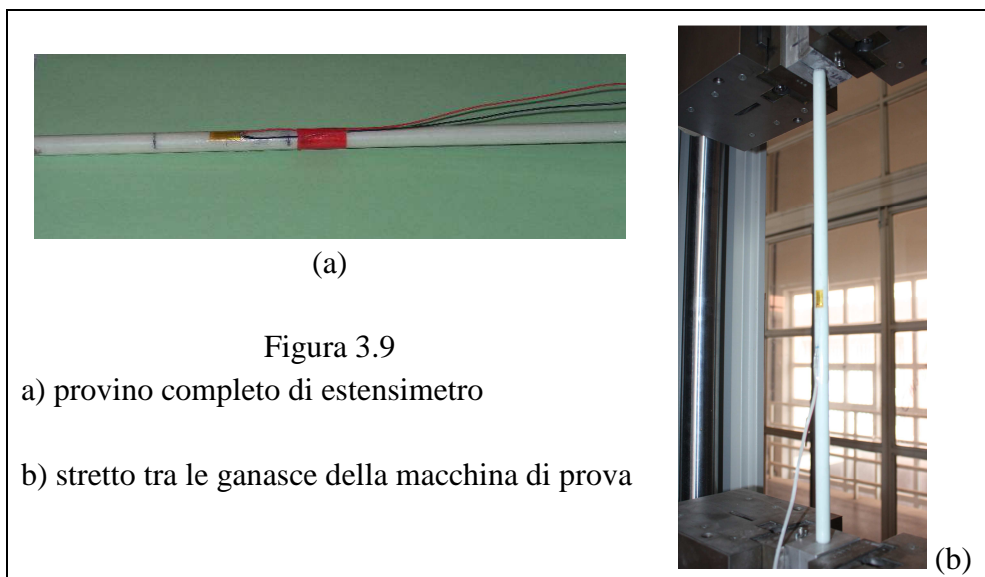


Figura 3.9

a) provino completo di estensimetro

b) stretto tra le ganasce della macchina di prova

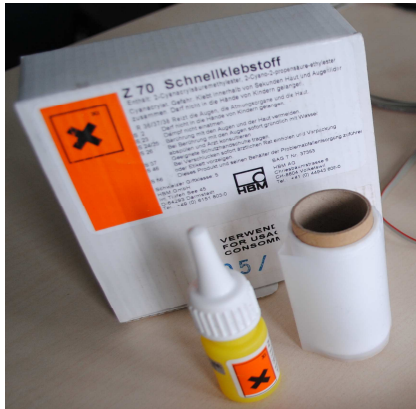


Figura 3.10: Adesivo per estensimetri

### 3.3 Macchinari e procedura sperimentale

Le prove di caratterizzazione meccanica delle barre sono state eseguite con una macchina elettromeccanica universale per prove combinate di trazione-torsione, con capacità a trazione di 250 KN (Figura 3.11) con classe di accuratezza 0,5 secondo le definizioni di cui alla norma ISO-7500-1.



Figura 3.11: Macchina di prova

La macchina è collegata ad un personal computer per l'acquisizione dei dati e per la registrazione del carico di rottura, che avviene tramite il software *testXpert*® (Figura 3.12).

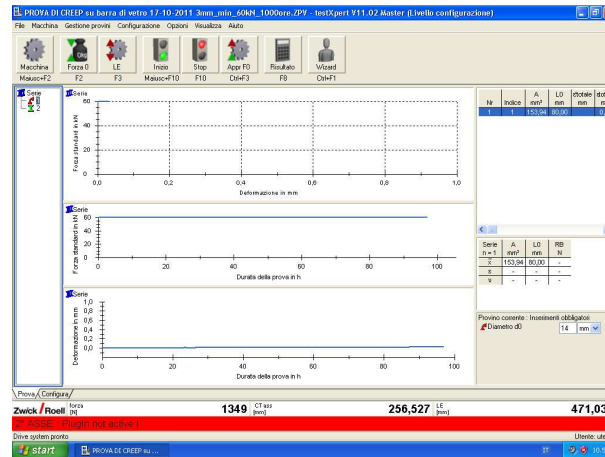


Figura 3.12: Software *testXpert*® per l'acquisizione del carico di rottura

Per la caratterizzazione delle barre sono state quindi eseguite delle prove monotone di trazione in controllo di spostamento della traversa, in accordo con le prescrizioni riportate nel DT 203/2006 [2]. In particolare, è stato fissato un gradiente di applicazione del processo di spostamento della traversa pari a 3 mm/min, costante per tutta la durata del test, in modo da realizzare una prova di tipo quasi statico e tale da garantire che il carico di rottura si raggiunga in un intervallo di tempo compreso tra 1 e 10 minuti.

Le prove di creep sono state condotte mediante l'ausilio della stessa macchina di prova in controllo di forza (Figura 3.11).

Per mantenere il carico ai livelli costanti prefissati, è stato necessario effettuare preliminarmente la taratura della risposta del sistema di prova, agendo sul guadagno dell'amplificatore del circuito. Tale operazione ha comportato la regolazione di un parametro definito "P-Portion". Alti valori di detto parametro provocavano forti oscillazioni della traversa, per via dell'elevata rigidità del materiale oggetto di prova.



Il valore del parametro compatibile con il tipo di barra impiegata è risultato essere pari a 0,1. Di seguito si riporta lo schema del circuito con l'amplificatore operazionale ed il parametro di guadagno del ciclo di controllo di forza (Figura 3.13).

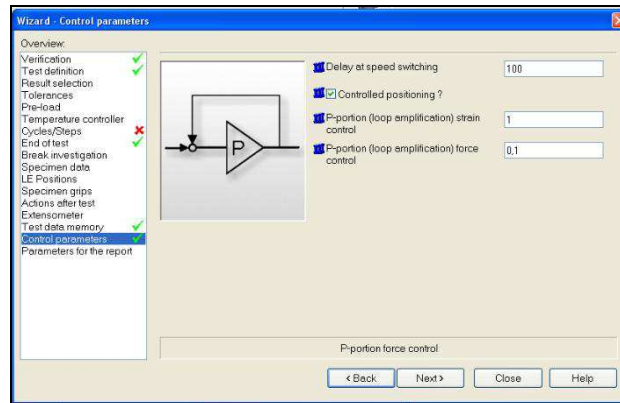


Figura 3.13: Circuito applicativo e parametri di controllo dell'amplificatore

Gli estensimetri elettrici per la lettura delle deformazioni, incollati nella sezione centrale dei provini, sono stati collegati ad una centralina estensimetrica (Figura 3.14), collegata a sua volta ad un Personal Computer, il quale acquisisce in automatico le deformazioni, tramite il software applicativo *StrainSmart*® (Figura 3.15).

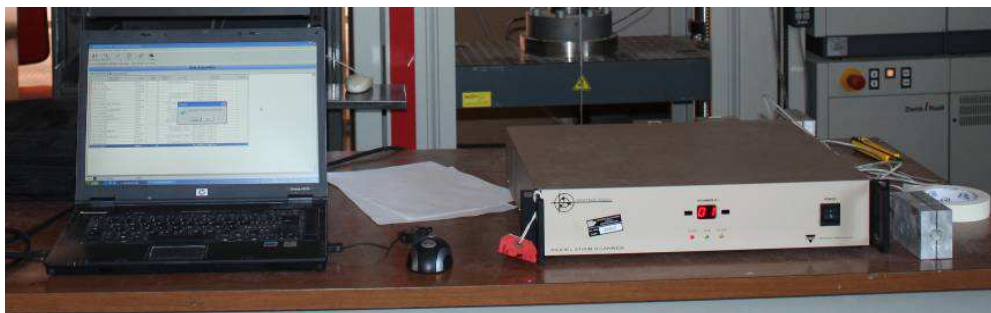


Figura 3.14: Centralina e PC per l'acquisizione della deformazione

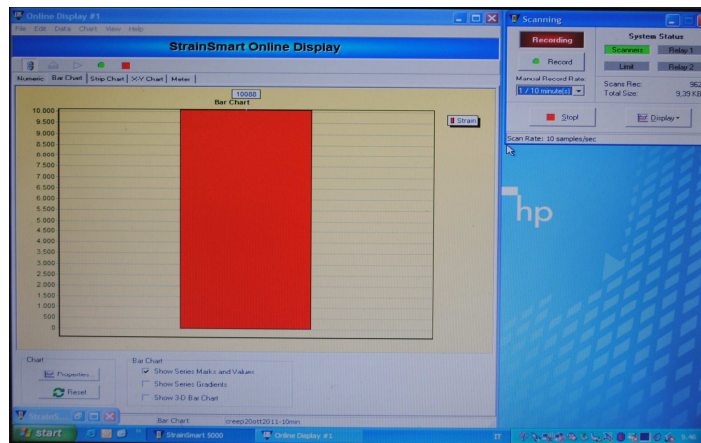


Figura 3.15: Software *StrainSmart*® per l'acquisizione della deformazione

Per l'esecuzione delle prove di creep non esistono indicazioni precise fornite dalle Istruzioni del CNR, le quali rimandano ad una norma UNI specifica per le barre di FRP, precisamente la ISO TC71/SC6N, ancora in fase di preparazione. In alternativa si suggerisce di far riferimento alla prova proposta dal documento ACI 440.3R-04 [4].

In accordo con le norme ACI, sono state condotte prove con quattro livelli di carico, precisamente pari all'80% , 70% , 60% e 50% del carico medio di rottura per trazione delle barre, determinato sperimentalmente.

Le prove sono state eseguite in controllo di forza, utilizzando un precarico di 500 N fino al raggiungimento del livello di carico costante prestabilito, con un gradiente costante di carico, uguale per tutti i livelli di carico prescelti.

Le prove sono state eseguite a temperatura ambiente e la loro durata è stata protratta anche fino a 500 ore (per le prove che non hanno provocato la rottura della barra). Sono state eseguite misurazioni automatiche della deformazione, ad intervalli di 10/15 minuti, a seconda della prevedibile durata della prova.



Le deformazioni, espresse in  $\mu\text{m}/\text{m}$ , sono state misurate a partire dall'istante in cui veniva raggiunto il carico costante di prova e sono state diagrammate, per ogni valore del carico applicato, in funzione del tempo (t) espresso in ore. I risultati delle suddette prove saranno illustrati e commentati nel capitolo 4.



## **CAPITOLO 4**

### ***Risultati e discussione***

#### **4.1 Prove di caratterizzazione meccanica**

Le prove di caratterizzazione meccanica sono state eseguite allo scopo di verificare la resistenza a trazione delle barre, indicata dal produttore nella scheda tecnica.

Sono state pertanto eseguite prove di trazione diretta in controllo di spostamento della traversa, con gradiente di applicazione del carico pari a 3 mm/min, in modo che la durata delle prove fosse inferiore a 10 min, come prescritto dal DT 203/2006.

Sono stati complessivamente testati 6 provini, di cui 2 sottoposti in precedenza a prove di creep. I risultati sperimentali delle prove di trazione effettuate sulle barre sono stati riepilogati nella tabella 4.1.

Tabella 4.1: Risultati sperimentali delle prove di trazione

Provino N.	Diametro [mm]	Forza di rottura [KN]	Tensione di rottura a trazione [MPa]
1	14	102,22	664
2	14	95,20	618
3	14	100,40	652
4	14	103,00	669
5 (sottoposto a creep)	14	102,09	663
6 (sottoposto a creep)	14	101,92	662
<b>VALORI MEDI</b>		<b>100,00</b>	<b>655</b>

Si può osservare come la resistenza a trazione delle barre integre (provini da n. 1 a 4) e di quelle già testate a creep (provini n. 5 e 6) sia dello stesso ordine di grandezza; ciò indica che il carico di creep fino a 60KN (60% di quello a trazione) mantenuto costante anche fino a circa 500 ore è ininfluenza sulla resistenza ultima del materiale.

Nella stessa tabella 4.1 si può notare che i valori di resistenza determinati sperimentalmente sono inferiori a quelli dichiarati dalla casa produttrice (tabella 3.1). Pertanto, per le successive prove di creep è stato preso come riferimento il valore medio della resistenza a trazione determinato sperimentalmente. In particolare, per il materiale oggetto di studio è stato calcolato un carico medio di trazione a rottura pari a 100 KN, cui corrisponde una tensione di trazione  $\sigma = 655$  MPa, essendo il diametro delle barre esaminate pari a  $\Phi 14$  mm, con una sezione retta  $A=153,94$  mm<sup>2</sup>.

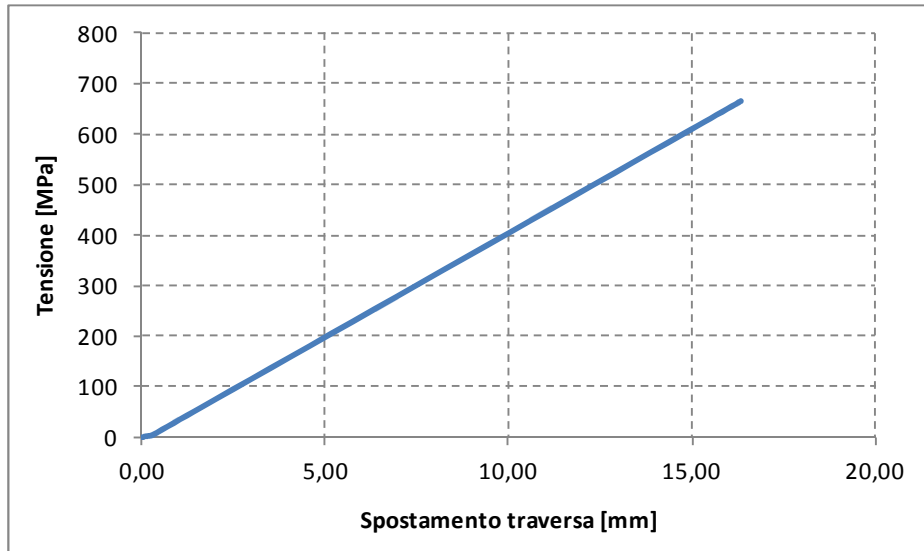


Figura 4.1: Prova di trazione diretta su barra di GFRP

In figura 4.1 è riportato, a titolo di esempio, il diagramma tensione-spostamento traversa al termine di una prova di trazione diretta, eseguita su una barra di GFRP.

Com'era atteso, tutte le barre sottoposte a prova hanno mostrato un comportamento elastico-lineare fino a rottura, che è sempre avvenuta in modo improvviso, con completa assenza della fase di snervamento; le barre, quindi, presentano un tipico comportamento fragile.

In figura 4.2 è documentata la modalità di rottura delle barre durante una prova di trazione diretta.

In tutte le prove eseguite, la rottura delle barre è avvenuta all'interno della zona libera del campione, compresa, cioè, tra i due dispositivi di ancoraggio

incollati alle estremità ( $L_p - 2 \cdot L_a$  - figura 3.2), convalidando in tal modo il dispositivo di afferraggio delle barre alla macchina di prova.



Figura 4.2: Modalità di rottura di una barra di GFRP in una prova di trazione

#### 4.2 Prove di creep

Per l'esecuzione delle prove di creep sono stati scelti 4 livelli di carico costante, precisamente pari all'80%, 70%, 60% e 50% del carico di rottura a trazione determinato sperimentalmente.

Per ogni carico sono state condotte almeno tre prove, di cui si riportano di seguito i risultati ottenuti. I diagrammi che seguono sono stati ricavati misurando in automatico, ad intervalli di 10/15 minuti a seconda della durata prevista per la prova, le deformazioni totali a partire dall'istante in cui si raggiungeva il carico costante di creep.

Tutti i diagrammi presentano un andamento caratteristico: ad una prima fase in cui la deformazione cresce velocemente (fase del creep primario), segue un intervallo di tempo, più lungo del precedente, in cui la deformazione cresce

con velocità minore e pressoché costante; quest'ultima fase rappresenta il creep secondario (figura 2.7). Con i valori più alti del carico di creep (80 e 70% di quello a rottura) proseguendo ulteriormente la prova, la deformazione della barra continua ad aumentare e si verifica un accumulo di danneggiamento del provino, che provoca infine la rottura dello stesso.

Inoltre, nelle prove di lunga durata (eseguita al 50 e 60% del carico di rottura), si può notare un'oscillazione ciclica delle deformazioni con periodo di circa 24 ore, che si può verosimilmente attribuire alle escursioni termiche tra giorno e notte.

Per ogni prova è stata eseguita una interpolazione dei dati sperimentali, con il metodo dei minimi quadrati, ricavando l'equazione della relativa curva interpolante.

La curva interpolante ha la forma di una legge di potenza, come quella suggerita da Findley (equazione 2.14), ma in questo caso l'equazione della curva comprende il contributo elastico iniziale  $\epsilon_0$ , che rappresenta cioè la deformazione elastica istantanea, esibita dalle barre al raggiungimento del carico costante di creep. Tale contributo è stato misurato dalle apparecchiature di prova ed esplicitato in ogni grafico.

Per ogni curva interpolante è stato indicato il valore del coefficiente di determinazione  $R^2$ , che, come noto, può assumere valori compresi nell'intervallo  $[0;1]$ . Esso misura, in una curva di regressione tra due variabili, la "bontà", ossia l'adeguatezza del modello adottato per descrivere la relazione tra le variabili stesse. Valori alti del coefficiente di determinazione indicano che esiste una soddisfacente approssimazione della curva interpolante con la curva sperimentale, ottenuta congiungendo i dati ricavati sperimentalmente.

Nei paragrafi seguenti sono riportati i diagrammi  $(\epsilon, t)$  registrati nelle varie prove eseguite, per ogni livello del carico applicato. In essi la deformazione è misurata in  $\mu\text{m}/\text{m}$  ed il tempo in ore.

Infine, per ogni valore del carico di creep, sono riassunti i dati caratteristici delle prove eseguite ed i valori ottenuti, come media dei singoli valori, per i parametri che compaiono nell'equazione di Findley.

#### 4.2.1 Prove di creep con carico da 80 KN (80% del carico di rottura)

Sono state eseguite complessivamente 3 prove con carico costante di trazione pari ad 80KN, sempre a temperatura ambiente. Nel grafico di figura 4.3 sono riportati i diagrammi ( $\epsilon, t$ ) di confronto delle prove eseguite con carico all'80%. In tutte le prove è avvenuta la rottura della barra, in un tempo compreso tra 11 e 14,50 ore.

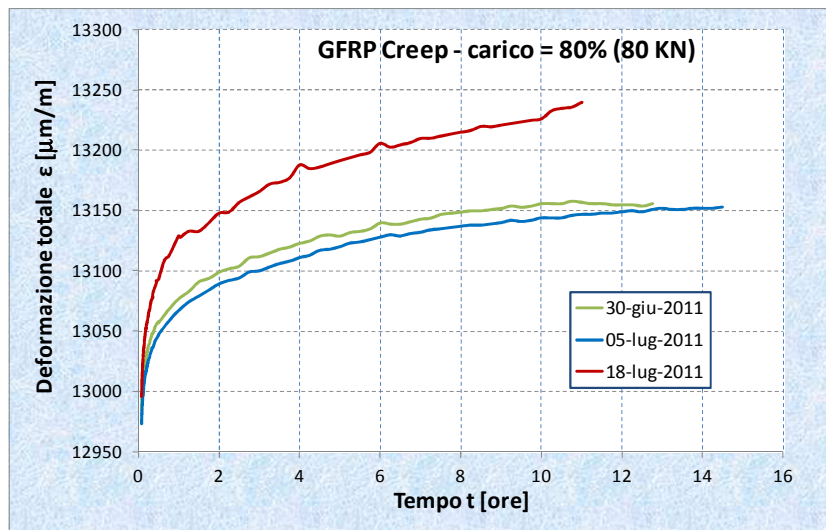


Figura 4.3: Diagramma di confronto ( $\epsilon, t$ ) prove di creep con carico all'80%

Dal confronto si evince che i tre provini hanno mostrato un comportamento molto simile, anche nella durata della prova, ossia nel tempo di rottura, che è avvenuta in poche ore dall'inizio della prova stessa.

Dal test eseguito sul provino n. 3 (colore rosso) si rileva che quest'ultimo ha esibito, però, delle deformazioni maggiori, con un tempo di rottura leggermente inferiore a quelli precedenti.

Di seguito si riportano i diagrammi ( $\epsilon, t$ ), che registrano la deformazione totale  $\epsilon$  misurata in funzione del tempo  $t$ , per ciascuna prova eseguita. Per ogni



prova i dati sperimentali sono stati interpolati con il metodo dei minimi quadrati, ottenendo per ciascun grafico la curva di “best-fitting”.

Su ogni grafico è stata indicata l’equazione della curva interpolante, che è una “legge di potenza” alla Findley (equazione 2.14).

Come già detto, a differenza dell’equazione di Findley, che ha la seguente espressione:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + m t^n,$$

l’equazione della curva utilizzata è del tipo :

$$\varepsilon(t) = a t^b. \tag{4.1}$$

Essa comprende, cioè, il contributo elastico iniziale  $\varepsilon_0$ , che rappresenta la deformazione elastica istantanea, esibita dalle barre al raggiungimento del carico costante di creep. Tale deformazione è stata misurata per ogni prova ed il suo valore è riportato nel relativo grafico; pertanto può essere sottratta dalla deformazione totale  $\varepsilon$ , qualora interessi conoscere il solo contributo della deformazione da creep, variabile nel tempo.

Dall’esame dei diagrammi delle tre prove eseguite, riportati singolarmente nei grafici delle figure 4.4, 4.5 e 4.6, si può notare che le curve interpolanti hanno coefficienti di determinazione  $R^2$  molto alti, quasi prossimi all’unità. Ciò significa, quindi, che il modello matematico adottato (legge di potenza alla Findley) è adeguato a descrivere il fenomeno studiato.

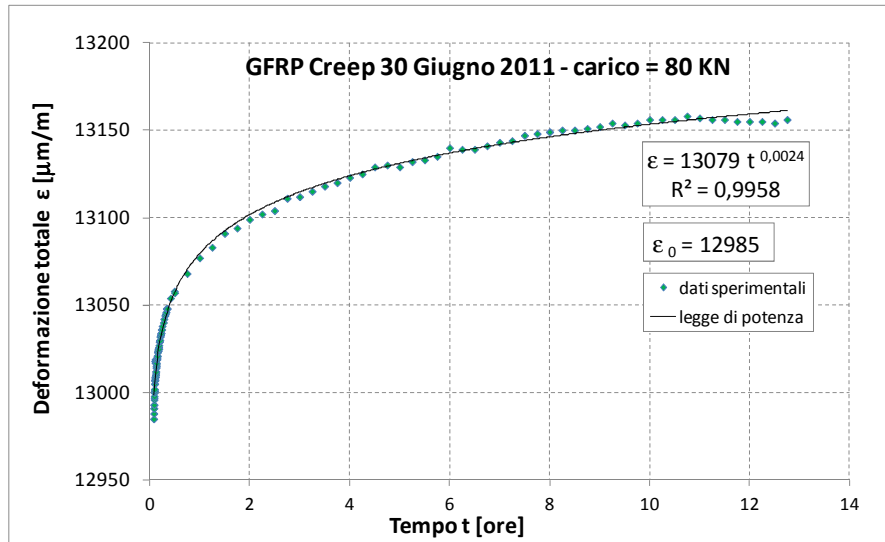


Figura 4.4: Diagramma ( $\epsilon, t$ ) prova di creep 30 Giugno 2011

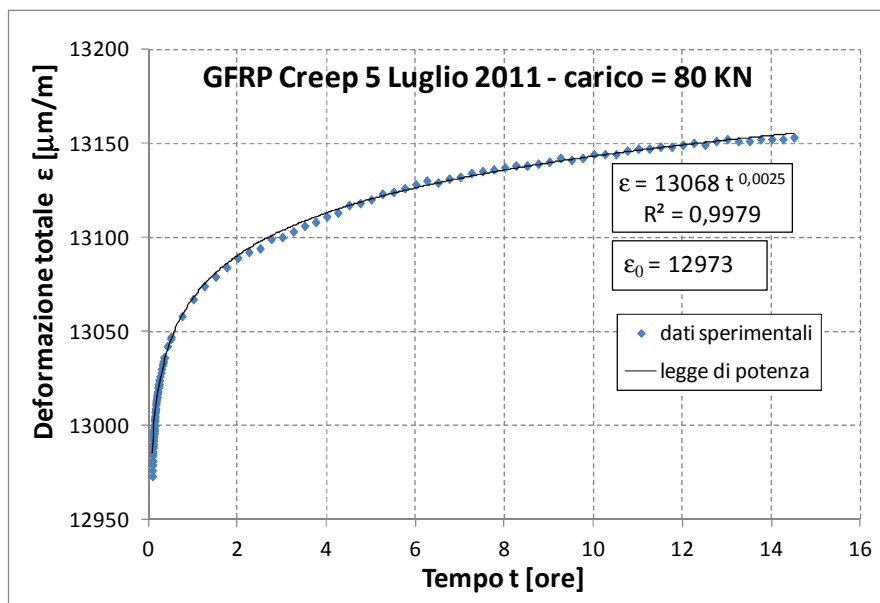


Figura 4.5: Diagramma ( $\epsilon, t$ ) prova di creep 5 Luglio 2011

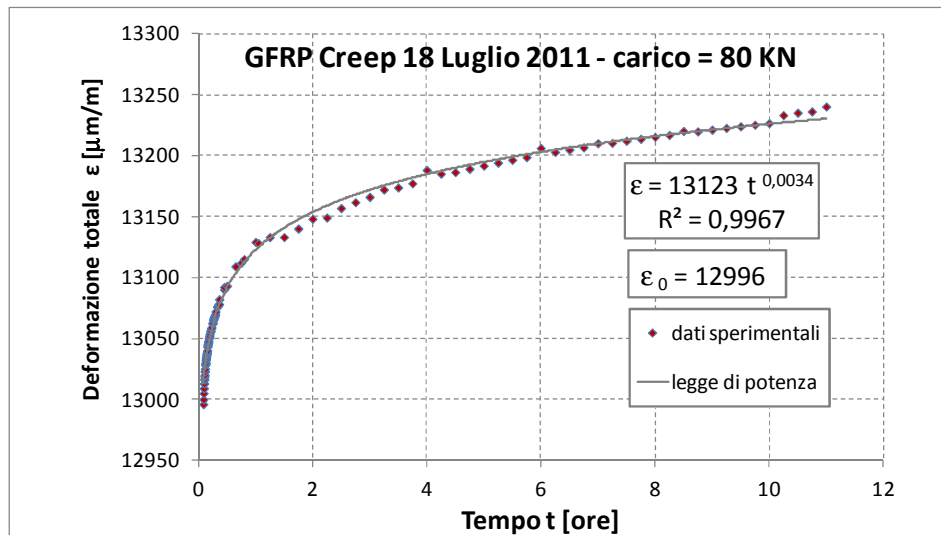


Figura 4.6: Diagramma ( $\epsilon, t$ ) prova di creep 18 Luglio 2011

Nella tabella che segue (Tabella 4.2) vengono riepilogati i risultati ottenuti nelle tre prove con carico all'80% (80KN). In particolare sono stati indicati: la deformazione elastica istantanea  $\epsilon_0$ , i coefficienti  $a$  e  $b$  dell'equazione della curva interpolante (4.1) ed il tempo di rottura  $t_r$ .

Tabella 4.2 Risultati prove di creep con carico di 80KN

Provino N.	Data inizio prova	$\epsilon_0$ [ $\mu\text{m/m}$ ]	$a$	$b$	$t_r$ [h]
1	30 giugno 2011	12985	13079	0,0024	12,75
2	5 luglio 2011	12973	13068	0,0025	14,50
3	18 luglio 2011	12996	13123	0,0034	11,00
<b>VALORI MEDI</b>		<b>12985</b>	<b>13090</b>	<b>0,0028</b>	<b>12,75</b>

Con i valori medi dei parametri è stata ottenuta la curva media di interpolazione, riportata in giallo nel grafico di figura 4.7.

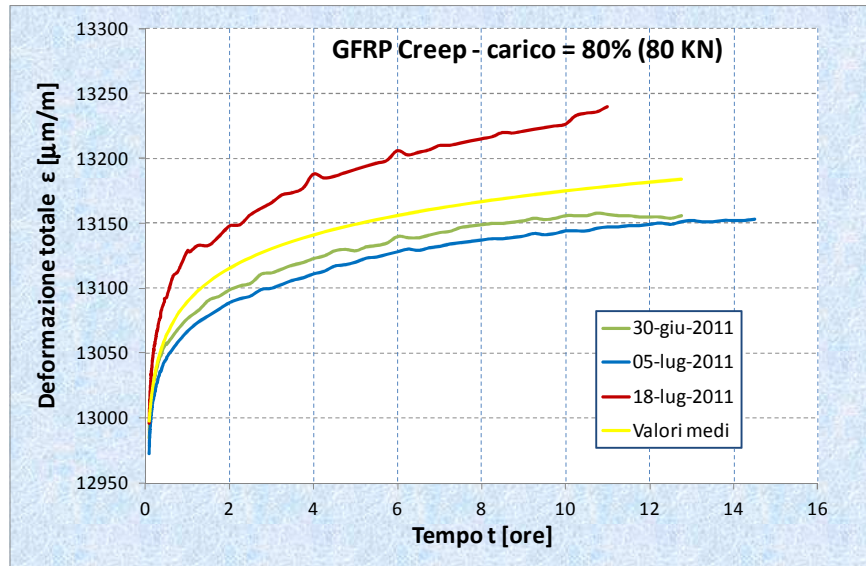
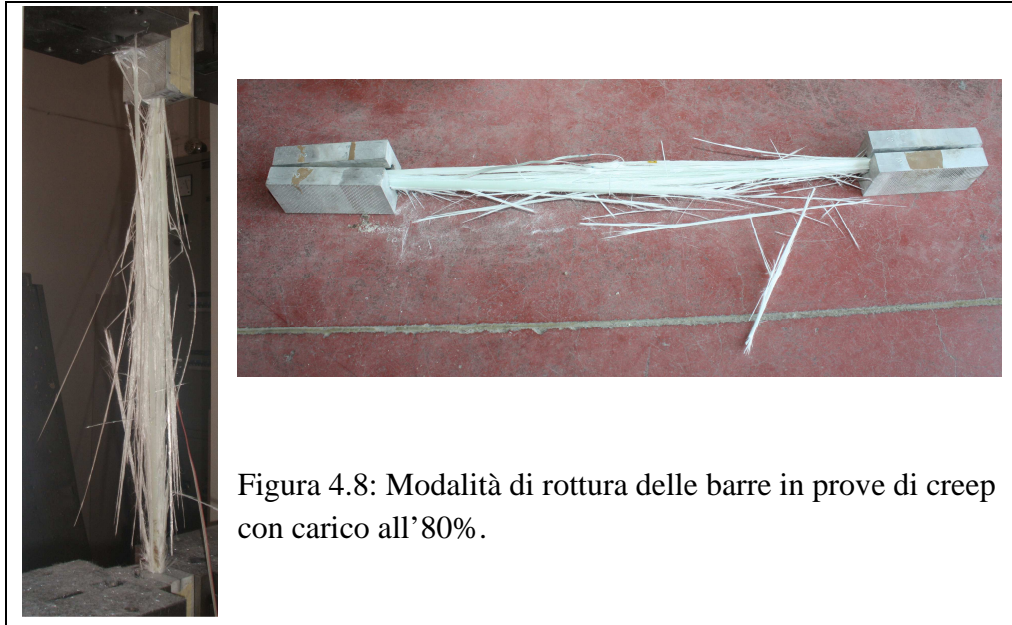


Figura 4.7: Diagramma ( $\epsilon,t$ ) di confronto prove di creep con carico all'80% e curva media di interpolazione.

Le modalità di rottura della barra, documentate in figura 4.8, sono simili a quelle delle prove di trazione (figura 4.2). In entrambi i casi si verifica la rottura delle fibre e lo scollamento dalla matrice polimerica, ma nella rottura per creep il danneggiamento è molto più evidente ed interessa un maggior numero di fibre.



#### 4.2.2 Prove di creep con carico da 70 kN (70% del carico di rottura)

Sono state eseguite complessivamente 5 prove con carico costante di trazione pari a 70kN, sempre a temperatura ambiente. Di queste, soltanto tre si sono svolte in maniera regolare e sono state elaborate e riportate nel grafico di confronto ( $\epsilon, t$ ) di figura 4.9. Nelle suddette prove è sempre avvenuta la rottura della barra, in un tempo variabile da 60 ore fino ad un massimo di circa 173 ore.

Dal grafico si può notare che il provino n. 2 (di colore azzurro) ha manifestato un comportamento a creep con andamento regolare, compreso tra le altre due curve, ma per esso la rottura si è verificata in un tempo decisamente minore, pari a circa 1/3 del tempo massimo registrato nelle altre prove.

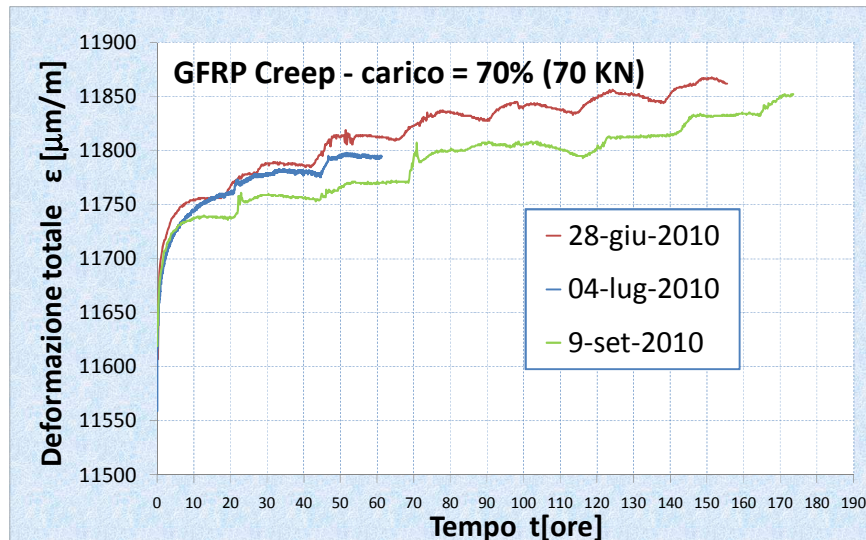
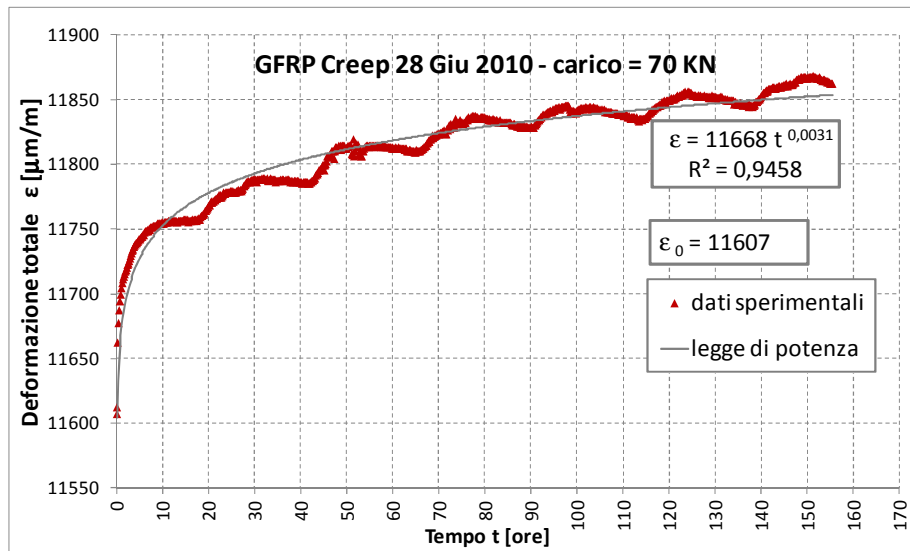
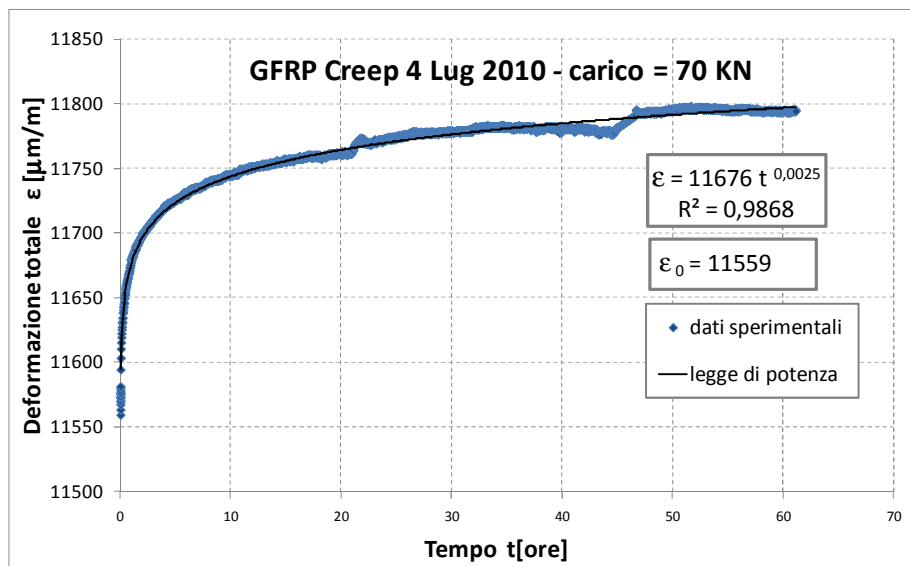


Figura 4.9: Diagramma di confronto ( $\epsilon, t$ ) prove di creep con carico al 70%

La variabilità del comportamento delle barre, che si manifesta con diversi valori delle deformazioni massime raggiunte o dei tempi di rottura, può essere spiegata con la presenza di difetti del materiale, che allontanano lo stesso dall'ipotesi di "materiale ideale" ovvero privo di difetti, assunta nella formulazione del modello teorico.

Infatti, nel processo di produzione delle barre in composito, realizzate con la tecnica della pultrusione, possono verificarsi difetti tali da modificare il comportamento meccanico ed in particolare quello viscoelastico del materiale. Tali difetti si identificano con la presenza di vuoti, disallineamento delle fibre, disomogeneità nella distribuzione delle fibre, che possono determinare una certa variabilità del comportamento del materiale.

Nei grafici delle figure 4.10, 4.11 e 4.12 sono riportate singolarmente le prove di creep eseguite con carico al 70%.

Figura 4.10: Diagramma ( $\epsilon,t$ ) prova di creep 28 Giugno 2010Figura 4.11: Diagramma ( $\epsilon,t$ ) prova di creep 4 Luglio 2010

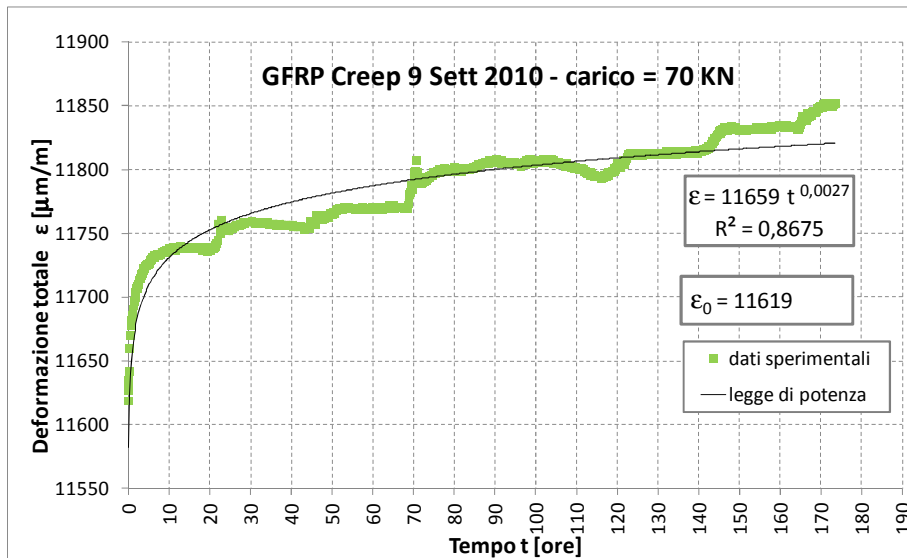


Figura 4.12: Diagramma ( $\epsilon, t$ ) prova di creep 9 Settembre 2010

Anche in questo caso le curve interpolanti presentano un soddisfacente grado di approssimazione, indicato dai valori alti del coefficiente di determinazione  $R^2$ .

In tutte le prove la rottura delle barre è avvenuta in maniera improvvisa, con rottura delle fibre e scollamento dalla matrice, come illustrato nelle foto di fig. 4.13 a) e b) e 4.14.



Figura 4.13 a: Modalità di rottura delle barre in prove di creep, carico al 70%.





Figura 4.13 b: Modalità di rottura delle barre in prove di creep, carico al 70%.



Figura 4.14 Particolare della rottura, con scollamento e rottura dell'estensimetro

Le prove eseguite hanno quindi dimostrato che il fenomeno del creep provoca la rottura della barra, già per valori pari al 70% di quello medio di resistenza statica del materiale e che gli effetti della rottura sulla barra sono molto più evidenti di quelli che si verificano in prove di resistenza a trazione.

Le rimanenti prove eseguite non sono state prese in considerazione, perché durante la loro esecuzione si sono verificati problemi, legati principalmente allo scivolamento dell'afferraggio dalle ganasce della macchina di prova o dalla barra stessa.

Tra le prove scartate viene riportata in figura 4.15, a titolo di esempio, una delle prime prove eseguite che ha avuto inizio precisamente nel mese di Novembre 2009 e nella quale si sono utilizzati gli ancoraggi in rame della prima fase sperimentale (figura 3.4). Dall'andamento del grafico si può notare che la barra inizialmente è stata correttamente soggetta a trazione e si è verificata la fase del creep primario (primo tratto della curva).

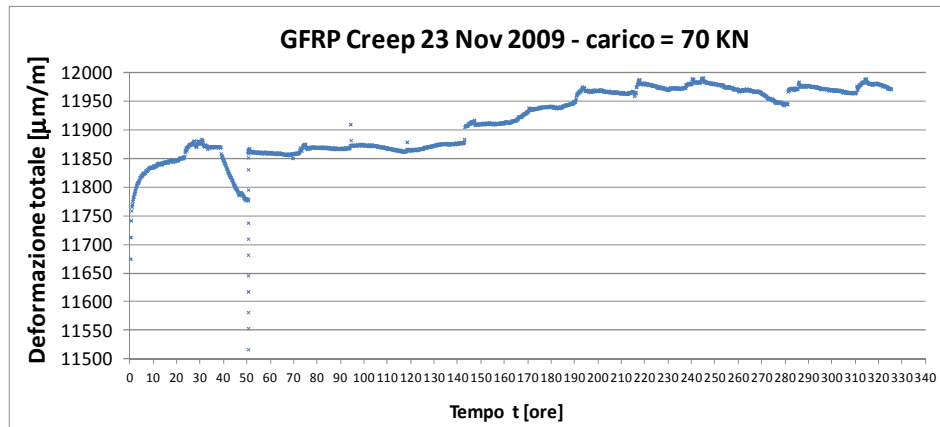


Figura 4.15: Diagramma ( $\epsilon, t$ ) prova di creep 23 Novembre 2009

Dopo circa 24 ore dall'inizio della prova, però, si sono manifestati i primi cedimenti dell'ancoraggio, con diminuzione della deformazione totale. La prova è proseguita con un andamento poco regolare, pur essendosi verificata la rottura della barra dopo circa 320 ore.

Proprio l'andamento di questa prova e di altre di trazione eseguite in precedenza, hanno dimostrato l'inadeguatezza di quel tipo di ancoraggio (tubolare in rame illustrato in figura 3.4), suggerendo l'utilizzo di un diverso dispositivo, che consentisse alla barra di sviluppare la resistenza massima senza slittamenti.

Nel diagramma di figura 4.16 viene, infine, riportata l'ultima prova eseguita, anch'essa non inserita nel grafico di confronto di figura 4.9.

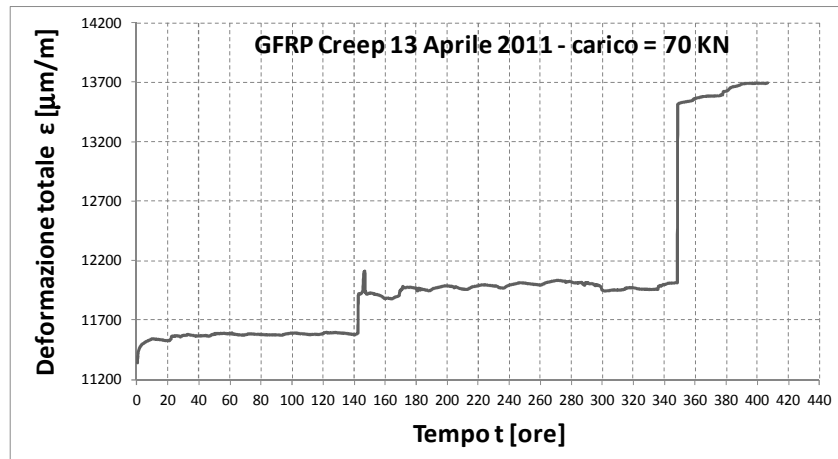


Figura 4.16: Diagramma ( $\epsilon, t$ ) prova di creep 13 aprile 2011

La prova, eseguita sempre con un carico di 70KN, ha mostrato nella prima fase un andamento accettabile. Dopo circa 140 ore dall'inizio, sono stati registrati due successivi "salti" improvvisi della deformazione totale, precisamente in concomitanza del manifestarsi di due lesioni nella barra nella direzione longitudinale e visibili nella foto in figura 4.17. Pertanto, la diminuzione della sezione trasversale della barra ha causato un aumento di tensione e, di conseguenza, della deformazione. La rottura di tali fibre ha consentito comunque il proseguimento della prova, non avendo interessato la zona prossima all'estensimetro.



Figura 4.17: Rottura della barra nella prova di creep 13 aprile 2011

La barra si è definitivamente rotta dopo circa 400 ore, in un tempo decisamente maggiore delle altre prove condotte con lo stesso valore del carico.

Nella Tabella 4.3 sono riepilogati i risultati sperimentali ottenuti nelle prove di creep con carico pari al 70% di quello medio a rottura, per le prove che sono state ritenute valide, ed i valori medi dei parametri con i quali è stata ottenuta la curva media di interpolazione, riportata in giallo nel grafico di figura 4.18.

Tabella 4.3 Risultati prove di creep con carico di 70KN

Provino N.	Data inizio prova	$\epsilon_0$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	a	b	$t_r$ [h]
1	28 giugno 2010	11607	11668	0,0031	155,5
2	4 luglio 2010	11559	11676	0,0025	61,0
3	9 settembre 2010	11619	11659	0,0027	173,5
<b>VALORI MEDI</b>		<b>11595</b>	<b>11668</b>	<b>0,0028</b>	<b>130,0</b>

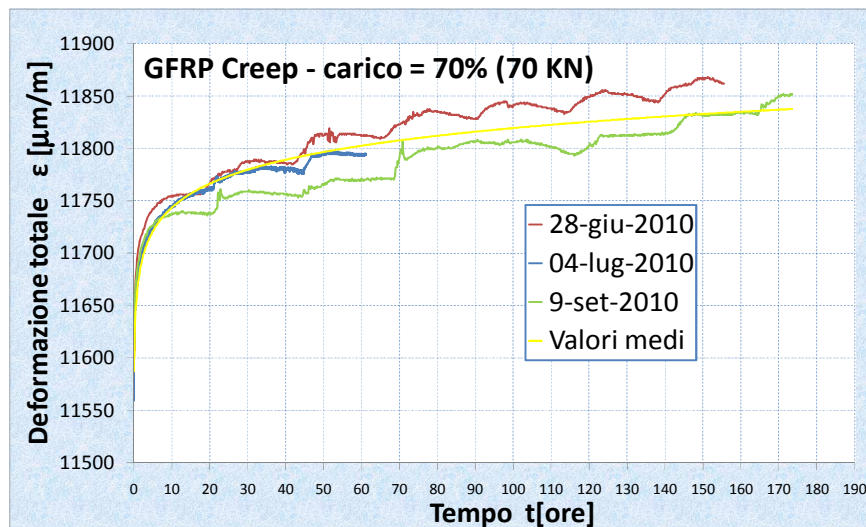


Figura 4.18: Diagramma ( $\epsilon,t$ ) di confronto prove di creep con carico al 70% e curva media di interpolazione.

#### 4.2.3 Prove di creep con carico da 60 KN (60% del carico di rottura)

Sono state eseguite 3 prove con carico costante di trazione pari a 60KN, a temperatura ambiente. Le prove hanno avuto una durata di circa 400 ore ed un'altra è stata protratta fino a circa 600 ore ed in esse non si è mai verificata la rottura del provino.

I grafici delle tre prove sono stati riportati nel grafico di confronto ( $\epsilon, t$ ) di figura 4.19.

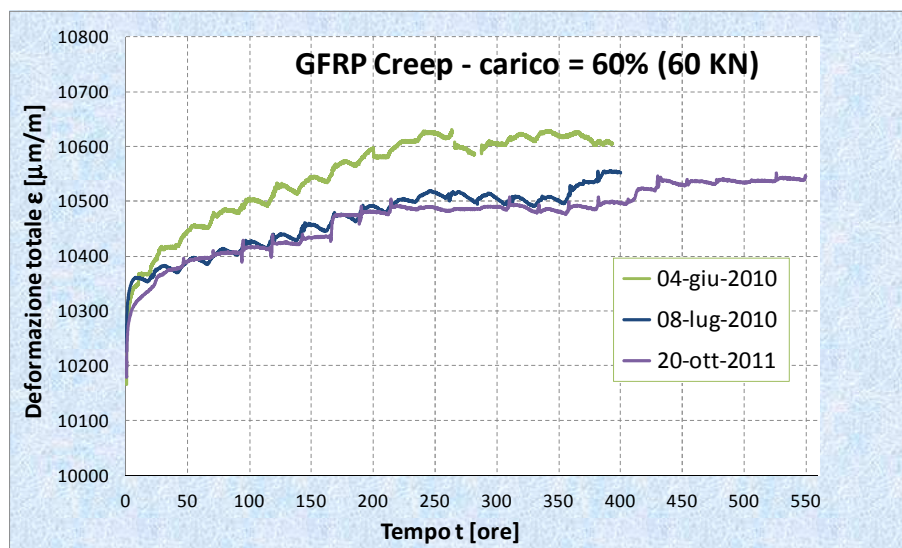


Figura 4.19: Diagramma di confronto ( $\epsilon, t$ ) prove di creep con carico al 60%

Nelle figure 4.20, 4.21 e 4.22 sono riportati singolarmente i grafici delle 3 prove, con le relative curve interpolanti.

Il motivo della diversa durata delle tre prove è da attribuire a cause funzionali e legate all'attività del Laboratorio di prova.

Un'altra problematica è legata alla mancanza di attrezzature di controllo della temperatura ambiente. Ciò sicuramente non costituiva un problema per le prove con alti valori del carico (70 ed 80%), che, come già visto, provocavano la rottura del provino in poche ore.

Nelle prove di lunga durata, invece, nonostante esse siano state eseguite in periodi temporali prossimi tra loro, non è stato possibile garantire uniformità della temperatura ambiente nel laboratorio. Repentine variazioni della temperatura esterna provocavano bruschi salti nei valori della deformazione, costringendo all'interruzione della prova stessa. Di ciò dovrà sicuramente tenersi conto in eventuali futuri sviluppi della ricerca.

A conferma di quanto sostenuto, si può notare in tutti i tre grafici una oscillazione ciclica della deformazione, con periodo di circa 24 ore, da attribuire proprio alle escursioni termiche tra giorno e notte.

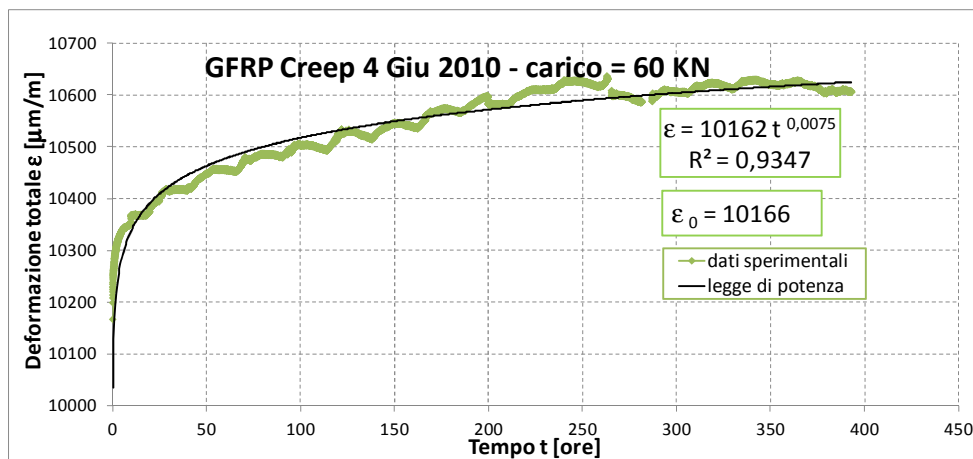
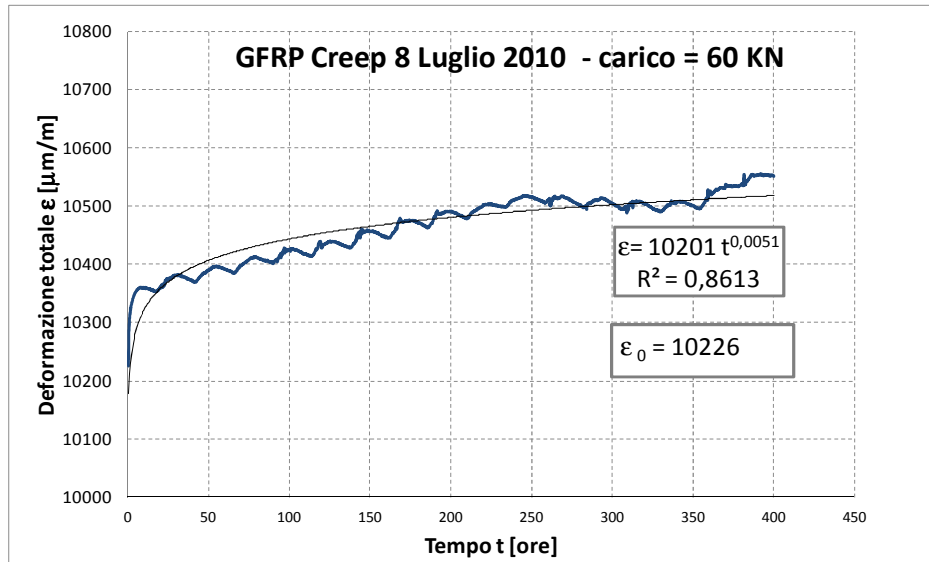
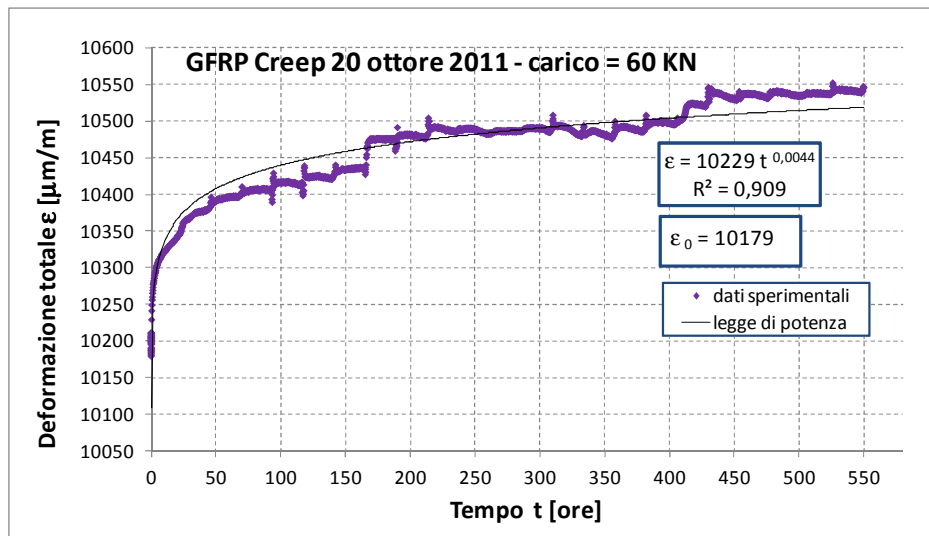


Figura 4.20: Diagramma ( $\epsilon,t$ ) prova di creep 4 Giugno 2010

Figura 4.21: Diagramma ( $\epsilon,t$ ) prova di creep 8 Luglio 2010Figura 4.22: Diagramma ( $\epsilon,t$ ) prova di creep 20 Ottobre 2011

Anche in questo caso, relativamente al periodo di prova, i valori alti del coefficiente di determinazione dimostrano l'adeguatezza del modello matematico alla interpretazione dei risultati sperimentali.

I risultati delle prove eseguite sono stati riepilogati nella Tabella 4.4, nella quale sono stati indicati anche i valori medi dei coefficienti forniti.

Con i valori medi è stata ottenuta la curva media di interpolazione, riportata nel grafico di figura 4.23.

Tabella 4.4 Risultati prove di creep con carico di 60KN

Provino N.	Data inizio prova	$\epsilon_0$ [ $\mu\text{m/m}$ ]	a	b
1	4 giugno 2010	10166	10109	0,0075
2	8 luglio 2010	10226	10201	0,0051
3	20 ottobre 2011	10179	10229	0,0044
<b>VALORI MEDI</b>		<b>10190</b>	<b>10180</b>	<b>0,0056</b>

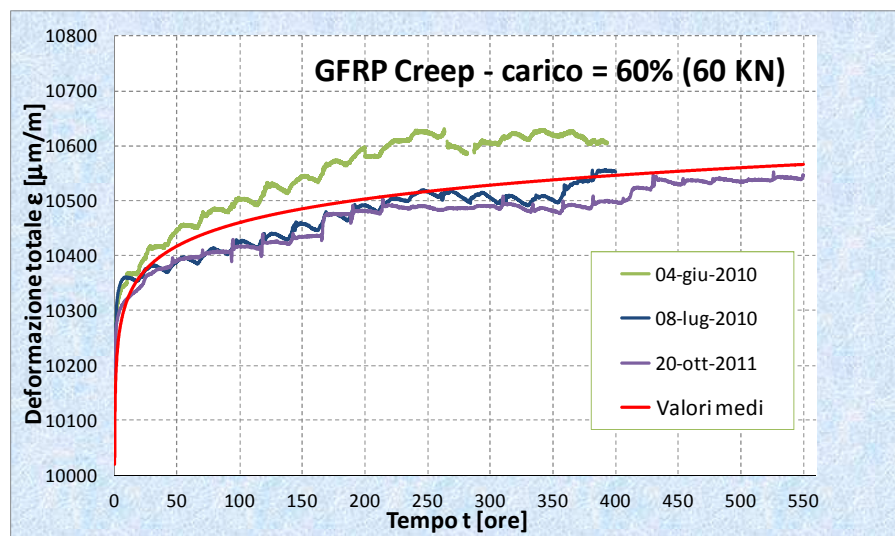


Figura 4.23: Diagramma ( $\epsilon,t$ ) di confronto prove di creep con carico al 60% e curva media di interpolazione.



#### 4.2.4 Prove di creep con carico da 50 KN (50% del carico di rottura)

Sono state eseguite complessivamente 3 prove con carico pari al 50% di quello medio a rottura, ma soltanto due sono state inserite nel grafico di confronto in figura 4.24, perché nell'esecuzione della terza prova si sono verificati dei problemi, come sarà di seguito spiegato.

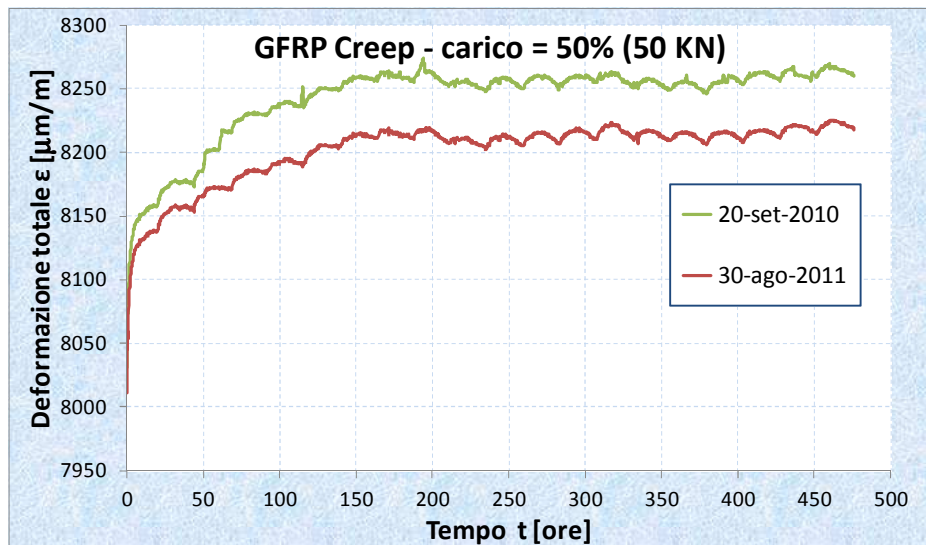


Figura 4.24: Diagramma di confronto ( $\epsilon, t$ ) prove di creep con carico al 50%

Le prove hanno avuto una durata di circa 500 ore, durante le quali non si è verificata la rottura del provino.

Anche in questo caso, non è stato possibile effettuare prove di durata maggiore di 500 ore, sia per motivi logistici legati all'attività del Laboratorio Ufficiale di Prova, che per l'impossibilità di controllare la temperatura ambiente con le attrezzature disponibili nel laboratorio stesso.

In ogni caso, le due prove eseguite hanno fornito risultati molto simili tra loro, caratterizzate sempre dall'oscillazione ciclica con periodo di circa 24 ore, dovuta alle escursioni termiche giornaliere.

Nelle figure 4.25 e 4.26 sono riportati singolarmente i grafici delle due prove eseguite, che sono stati elaborati ed interpolati con il metodo dei minimi quadrati. Anche in questo caso la curva interpolante del tipo legge di potenza, secondo il modello proposto da Findley, è risultata essere molto prossima alla curva sperimentale, con valori del coefficiente di determinazione  $R^2$  maggiori di 0,90 per ciascuna curva.

Ciò nonostante, dai grafici si può notare che, dopo circa 150 ore dall'inizio della prova, la deformazione sembra attestarsi su valori pressochè costanti, come se il fenomeno del creep si fosse quasi esaurito, a differenza dei grafici con carico al 60%, in cui si evidenzia una tendenza più marcata all'aumento della deformazione.

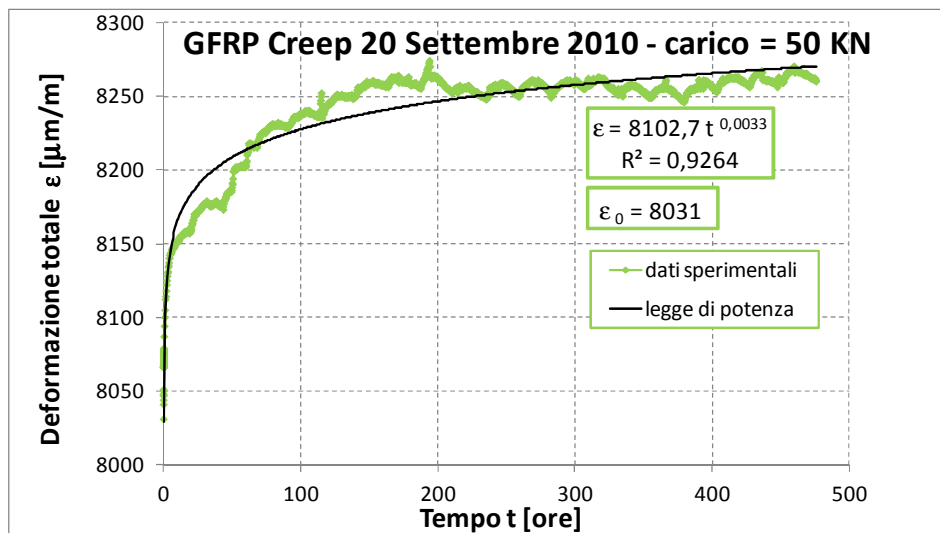


Figura 4.25: Diagramma ( $\epsilon, t$ ) prova di creep 20 Settembre 2010

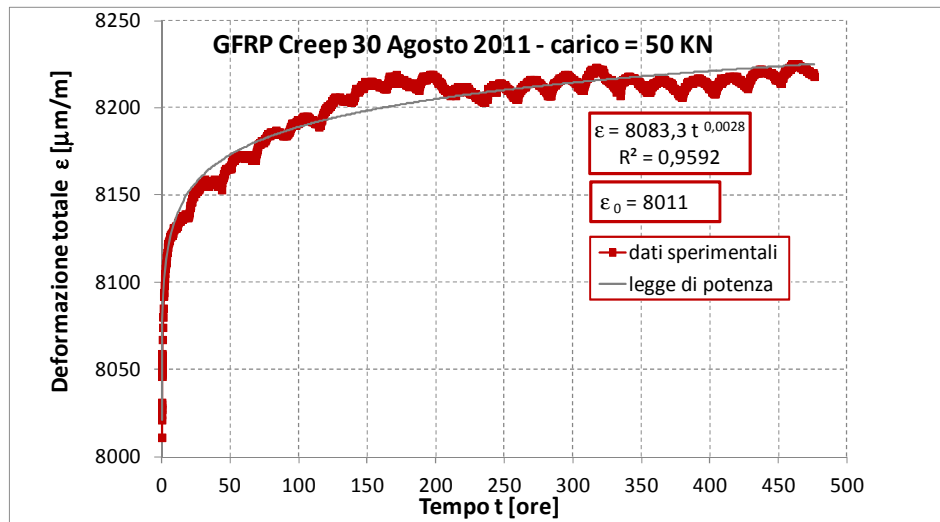


Figura 4.26: Diagramma ( $\epsilon, t$ ) prova di creep 30 Agosto 2011

I risultati delle prove sono stati riepilogati nella Tabella 4.5, nella quale sono stati indicati anche i valori medi dei coefficienti calcolati.

Tabella 4.5 Risultati prove di creep con carico di 50KN

Provino N.	Data inizio prova	$\epsilon_0$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	a	b
1	20 settembre 2010	8031	8102	0,0033
2	30 agosto 2011	8011	8033	0,0028
<b>VALORI MEDI</b>		<b>8021</b>	<b>8093</b>	<b>0,0031</b>

La curva ottenuta con i coefficienti medi calcolati è stata riportata nel grafico di fig. 4.27.

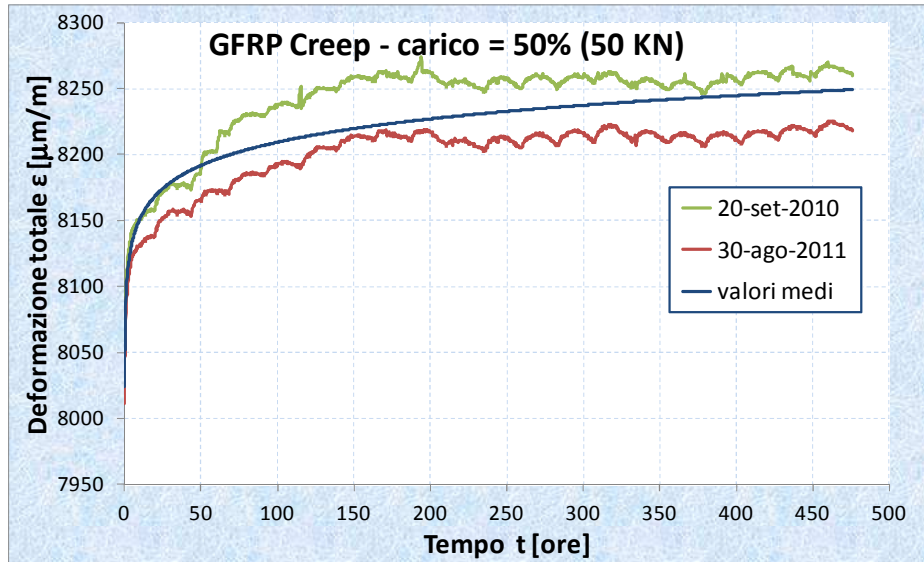


Figura 4.27: Diagramma ( $\epsilon,t$ ) di confronto prove di creep con carico al 50% e curva media di interpolazione.

Una terza prova, sempre con carico di creep pari a 50 KN, è stata eseguita nel periodo ottobre 2010, ma i risultati non sono stati presi in considerazione perché il grafico deformazione-tempo registrato ha mostrato, sin dalle prime ore dall'inizio della prova, evidenti scivolamenti degli afferraggi, con continue cadute di deformazione, come si può notare dalla figura 4.28.

Tali slittamenti sono probabilmente da attribuire a cattiva esecuzione dell'incollaggio delle due parti metalliche dell'afferraggio alle estremità della barra.

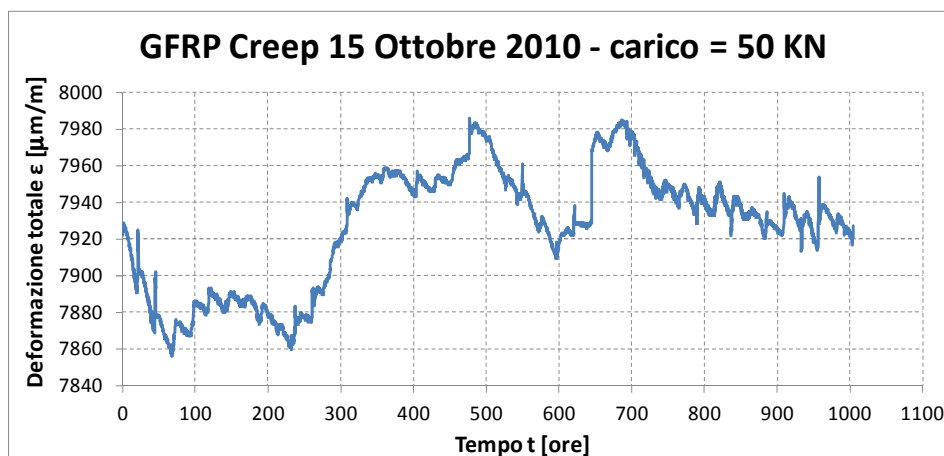


Figura 4.28: Diagramma ( $\epsilon,t$ ) prova di creep 15 Ottobre 2010



## CAPITOLO 5

### *Progetto di un tirante con barre di FRP*

#### **5.1 Introduzione**

I tiranti di ancoraggio sono elementi strutturali operanti in trazione, in grado di trasmettere forze al terreno grazie ad un'armatura ed un bulbo di ancoraggio. Vengono utilizzati in vari campi della geotecnica ed in particolare per stabilizzare pareti rocciose, per ancorare al terreno paratie e muri di sostegno o consolidare volte di gallerie soggette a forte pressione idrostatica (Fig. 5.1). La funzione dei tiranti di ancoraggio è quindi quella di trasferire i vincoli necessari alla statica dell'opera in zone in cui il terreno può assorbire le forze in gioco.

I primi tiranti tradizionali per l'ancoraggio in terreni sciolti e rocce deboli sono stati realizzati negli anni '60 ed il loro impiego è rapidamente cresciuto con un considerevole vantaggio nelle lavorazioni da eseguirsi in scavi aperti, per via dell'eliminazione di strutture di contrasto, generalmente molto fastidiose.



Fig. 5.1 : Esempi di realizzazioni di strutture con tiranti d'ancoraggio



Negli ultimi 30 anni si sono conseguiti notevoli miglioramenti nella tecnologia degli ancoraggi, sia provvisori che permanenti, con risultati significativi nell'incremento della capacità portante di carico, con l'aumento della dimensione del foro e del tirante, con il miglioramento delle tecniche di installazione, con l'introduzione dell'iniezione a pressione e delle iniezioni ripetute e con l'acquisizione di una più approfondita conoscenza dei meccanismi di trasferimento del carico. Gli sviluppi citati hanno dato notevoli risultati nell'aumento della capacità di carico dei tiranti convenzionali passata dai 250/600 KN degli anni '60, ai 500/1000 KN attualmente raggiungibili.

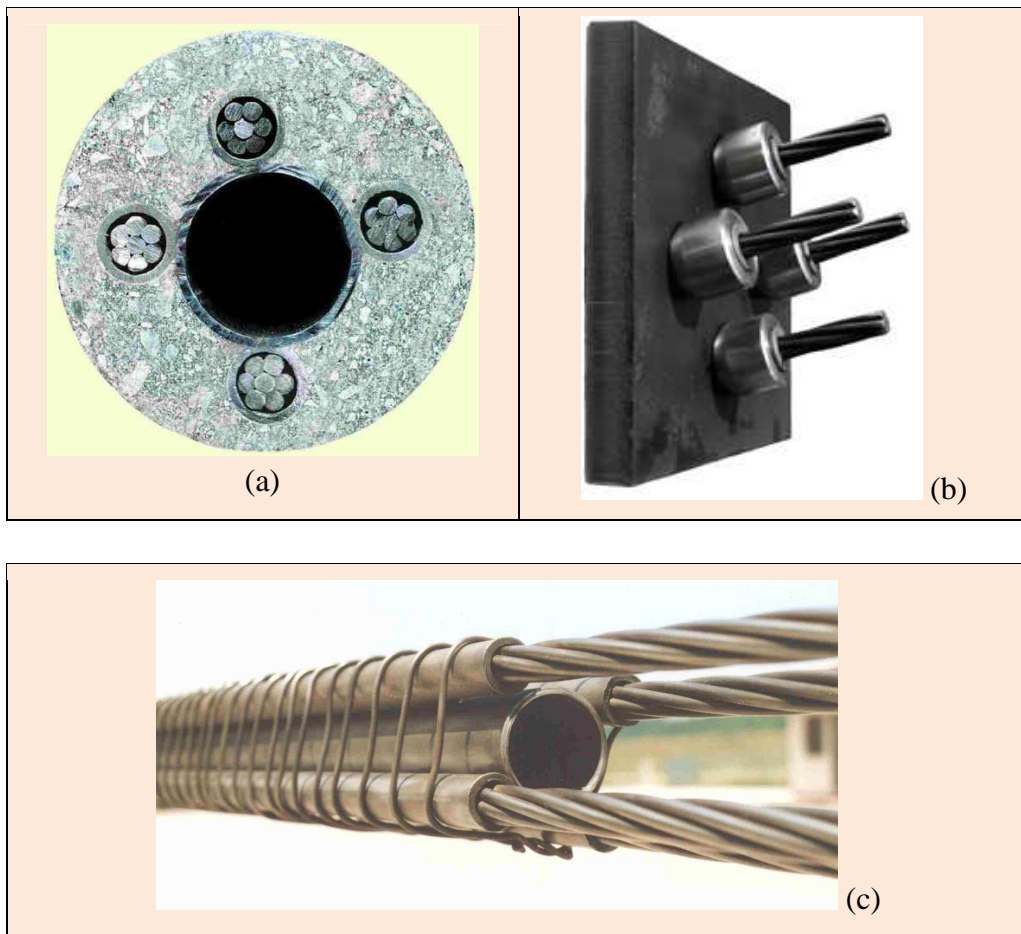


Figura 5.2: Tirante tradizionale - a) sezione trasversale, b) piastra di testata  
c) armatura in trefoli di acciaio armonico

Rimane ancora oggi di difficile soluzione il problema della protezione delle barre di armatura dai fenomeni di corrosione, che è riconosciuto come il primo fattore di deterioramento e quindi di riduzione della vita di servizio della struttura.

I rimedi finora utilizzati, come l'uso di guaine di protezione, ingrassaggio dei cavi con grasso di grafite o realizzazione di copriferri tramite l'uso di calcestruzzi ad alta resistenza e con discreto spessore, si sono comunque dimostrati inadeguati nel lungo termine a proteggere i cavi metallici dall'ossidazione, riducendo l'efficacia del tirante e, di conseguenza, la vita utile dell'intera struttura.

Le barre di polimero fibro-rinforzato FRP, in sostituzione dei tradizionali cavi in acciaio, costituiscono una promettente soluzione al problema della corrosione essendo, per la loro stessa natura, non soggette a fenomeni corrosivi. E' stato già in precedenza discusso di come negli ultimi anni l'uso di barre di FRP nell'Ingegneria Civile si sia ampiamente diffuso, proprio grazie a questa fondamentale caratteristica dei materiali polimerici di non essere sensibili ai fenomeni della corrosione. Ma anche gli altri motivi evidenziati e non meno importanti, in particolare l'alta resistenza a trazione in ragione di un basso peso specifico, che rendono attrattivo l'uso di barre di FRP in sostituzione delle armature tradizionali in acciaio nel calcestruzzo, possono essere altrettanto interessanti nella costruzione di opere geotecniche. L'idea di utilizzare i materiali compositi per realizzare un tirante di ancoraggio nasce, quindi, dall'accoppiamento di tutte queste peculiarità offerte dagli FRP, che in sostanza possono riassumersi in: elevate caratteristiche meccaniche, basso peso specifico e resistenza ai fenomeni corrosivi.

## **5.2 Caratteristiche del prototipo di tirante**

Il prototipo ideato è un nuovo tipo di tirante, utilizzabile per l'ancoraggio di opere di contenimento. La sua caratteristica principale è costituita dall'impiego di barre di materiale composito fibrorinforzato FRP in fibre di vetro o di carbonio.

L'idea nasce principalmente allo scopo di realizzare un elemento strutturale particolarmente leggero, maneggevole ed assolutamente resistente alla corrosione, ma capace, allo stesso tempo, di offrire considerevoli capacità portanti.

Nel tirante si distinguono due parti funzionali, ossia un tratto passivo, in cui le barre sono libere ed un tratto attivo, che costituisce la fondazione del tirante, ancorata al terreno tramite malte che vengono iniettate a pressione, con sistemi che si diversificano a seconda della natura del terreno stesso.

Una volta che il tirante sia stato ancorato al terreno, si esegue la tesatura delle barre, utilizzando attrezzature specifiche consistenti in centraline, martinetti e manometri inseriti nella piastra di testata. La piastra di testata ha lo scopo di trasferire al terreno o alla struttura il carico di trazione fornito dalle barre.

Le principali fasi esecutive del tirante sono le seguenti:

- perforazione del terreno
- introduzione del tirante pre-assemblato
- iniezioni della malta cementizia
- tesatura dei cavi
- iniezione del tratto passivo.

### **5.3 Materiali impiegati**

Per la realizzazione del prototipo si utilizzeranno barre di FRP in fibra di carbonio o di vetro dei diametri  $\Phi 12$  o  $\Phi 16$  mm (in numero e diametro variabili a seconda della necessità), con elevata percentuale di fibre (non minore del 60%) e valori medi di resistenza e modulo elastico; va precisato che la resistenza garantita a trazione per tale materiale coincide con la tensione di rottura, vista l'assenza di fenomeni di snervamento (le barre, infatti, hanno un comportamento elastico lineare fino alla rottura, che avviene in maniera improvvisa).

Per la realizzazione delle staffe, sia nel tratto libero che in quello annegato nella miscela di iniezione, si utilizzeranno, invece, profilati in FRP a sezione circolare del diametro esterno 110 mm e con spessore 5 mm, che verranno tagliati in strisce di larghezza 10 mm (fig. 5.3).

### 5.4 Caratteristiche costruttive

Il tirante in oggetto è costituito da barre di FRP filettate (figura 5.3) in numero variabile da 4 a 8 e del diametro  $\Phi 12/16$ , disposte in maniera assialsimmetrica rispetto al centro del perforo, il quale è previsto avere un diametro di 140 mm. In rapporto alle modalità di installazione, sono state sviluppate due varianti, di cui la prima (tipo A) utilizza un tubo valvolato, posto in posizione assiale, per effettuare le iniezioni di primo e di secondo tempo; mentre la seconda variante (tipo B) impiega un sacco otturatore per separare il bulbo di ancoraggio dalla parte libera. A seconda delle condizioni del terreno in cui il tirante verrà installato, un tipo potrà essere preferito rispetto all'altro.

L'assenza dei fenomeni corrosivi, che come già detto costituisce la peculiarità di questo tirante, non obbliga all'uso di alcuna protezione delle barre, né al loro ricoprimento con calcestruzzo. Ciò, unito al minore peso specifico degli FRP rispetto all'acciaio, contribuisce alla riduzione complessiva del peso di tutto il tirante.

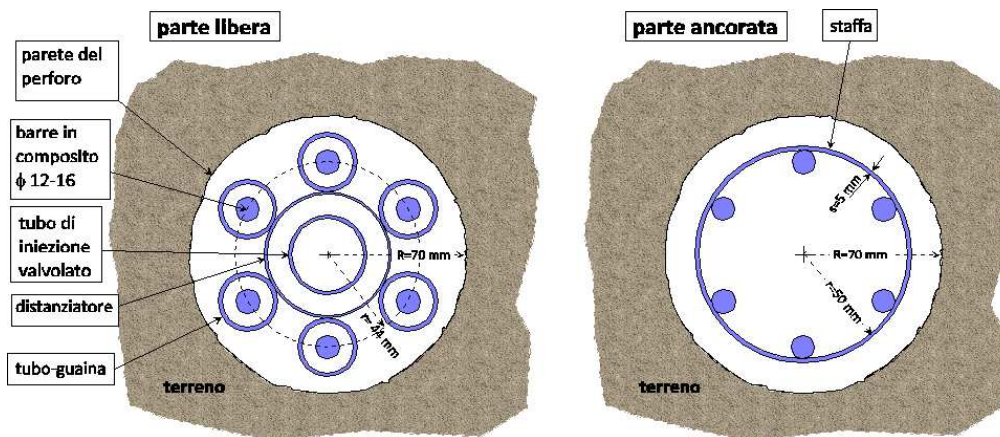


Figura 5.3: Sezione trasversale del tirante tipo A

In ambedue i tipi proposti, le barre longitudinali, dotate di superficie laterale filettata per consentire una migliore aderenza nella zona iniettata ed il serraggio con i dadi della testata, sono incollate alle staffe e tra loro collegate

attraverso manicotti, in cui l'azione di congiunzione è affidata all'effetto combinato dell'avvitamento e del collante, di cui viene intrisa la filettatura.

La staffatura nella zona di ancoraggio (bulbo) sarà realizzata con anelli in materiale composito, ottenuti da tubi dello spessore di 5 mm e del diametro interno di 100 mm, tagliati in sottili strisce della larghezza di 10 mm.

Il numero delle staffe nella zona ancorata è variabile, in funzione del tiro di esercizio a cui il tirante è sottoposto. Nella zona libera, invece, si porranno solamente dei distanziatori con passo di circa 1 m, con lo scopo precipuo di mantenere inalterata la disposizione geometrica delle barre nelle varie sezioni. È allo studio la possibilità di conferire alle barre un andamento ondulato, grazie alla loro leggera flessibilità, con lo scopo di aumentare l'aderenza tra le barre e la miscela di iniezione, utilizzando distanziatori e legature. In corrispondenza delle staffe sono disposti anche i centratori a "fiasco", con i quali il tirante viene mantenuto in posizione centrale rispetto al foro (figura 5.4).



Figura 5.4: Centratore a "fiasco"

I tiranti, costituiti da barre pressoché rigide, non possono essere arrotolati in bobine e questo ne rende difficile il trasporto, una volta che le varie parti del tirante siano stati assemblate; mentre, le ridotte dimensioni dei singoli componenti strutturali rende molto agevole il trasporto dei componenti disassemblati. Di conseguenza, è conveniente eseguire l'assemblaggio in cantiere, tanto più che tale operazione risulta poco onerosa, trattandosi di operazioni di giunzione con manicotti e di incollaggio delle singole parti

strutturali con resine. Le barre della lunghezza di 5-6 m sono, dunque, giuntate in cantiere per avvvitamento dei manicotti dopo che le filettature sono state spalmate di collante. Le barre vengono poi fissate alle staffe attraverso incollaggio e temporaneo fissaggio con filo sottile di ferro. Vengono poi applicati centratori, distanziatori, il puntale e i vari tubi di iniezione e di sfiato, mediante incollaggio. Facilitato dalla presenza di un puntale in plastica (Figura 5.5), il tirante viene infilato nel foro predisposto per alloggiarlo, il quale viene realizzato con le tecniche ordinarie di perforazione per rotazione o roto-percussione, da scegliersi a seconda della natura del terreno e dell'eventuale presenza di falde idriche.



Figura 5.5: Puntale in plastica

Come già detto, sono stati ideati due diversi tipi di tirante, indicati con tipo A e tipo B, i quali riprendono tipologie già in uso ed ampiamente sperimentate, sia pure limitatamente all'impiego di trefoli in acciaio armonico.

#### 5.4.1 Tirante tipo A

Il tirante tipo A (figura 5.6 a) è dotato di un tubo centrale cieco (con fondo chiuso) in pvc del diametro interno di 34 mm e dello spessore di 3 mm, il quale è in grado di sopportare una pressione fino a 50 atm. Qualora si dovesse operare con pressioni maggiori, fino a 90 atm, è necessario ricorrere ad un tubo in pvc di diametro di 34/27 o 38/27 mm. Il tubo è dotato di valvole di non ritorno (con pressione di apertura di 2 atm), poste a coppia a interasse di 1 m, attraverso le quali si effettuano le iniezioni di primo e di secondo tempo.

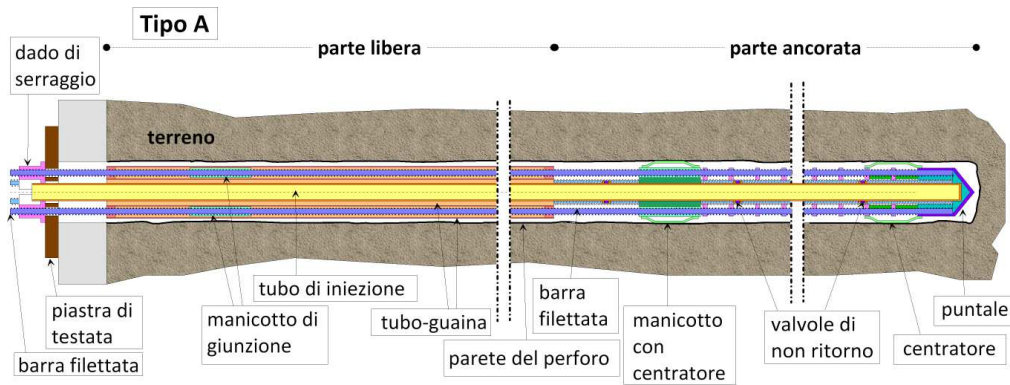


Figura 5.6 a: Sezione longitudinale del tirante tipo A

Nella zona di ancoraggio le barre sono libere, perché possano essere ricoperte dalla miscela di iniezione; mentre nella parte libera del tirante esse sono alloggiati in tubi, aventi funzioni di guaina, con diametro di 30-35 mm, tenuti insieme per incollaggio ad un distanziatore e sigillati con due tamponi in corrispondenza delle estremità. In tali tubi, le barre possono scorrere liberamente durante l'operazione di tesatura.

Una volta inserito il tirante nel foro, si introduce un packer a doppio otturatore nel tubo centrale di iniezione (Fig. 5.6 a) e, in corrispondenza dell'ultima coppia di valvole in prossimità del puntale, viene iniettata miscela cementizia alla pressione di 6 atm (iniezione primaria). Questa iniezione ha lo scopo di realizzare il riempimento dell'intercapedine tra la parete esterna del tubo di iniezione e la parete del perforo (formazione della camicia). In questa fase vengono espulsi gli eventuali fluidi di perforazione presenti nel foro.

L'iniezione primaria viene eseguita con una miscela di acqua/cemento con rapporto 1.1-1.5/1, con l'aggiunta di bentonite in percentuale in peso tra il 5 ed il 10% rispetto al peso del cemento. Al termine dell'iniezione di primo tempo, si procede ad un accurato lavaggio dell'interno del tubo di iniezione, in modo che il packer possa esservi successivamente reintrodotta per ulteriori iniezioni.

Trascorso un certo tempo (generalmente tra 10 e 15 ore, a seconda delle condizioni generali del terreno e delle procedure di installazione), si procede all'iniezione di secondo tempo, che riguarda la sola parte ancorata (bulbo).

Sempre partendo dalla coppia di valvole in fondo al tirante e procedendo via via verso l'esterno, si procede ad iniettare miscela cementizia alla pressione di 20-30 atm attraverso le valvole, controllando sempre che le pressioni di iniezione siano tollerabili dal tubo usato per questa operazione. La pressione di iniezione rompe localmente la camicia e produce delle sbulbature, con l'addensamento del terreno circostante e la possibilità di ottenere elevate coazioni tra tirante e terreno laterale. In questa fase, la miscela ha un rapporto acqua/cemento da 1/1.5 a 1/2, con l'aggiunta di additivi antiritiro.

Qualora si intenda effettuare ulteriori iniezioni in tempi successivi, è necessario effettuare la pulizia del tubo, al termine delle operazioni di iniezione secondaria.

Una volta che sia avvenuta la maturazione della miscela di iniezione secondaria, si può procedere alla tesatura delle barre di composito.

### 5.4.2 Tirante tipo B

In alcuni terreni e rocce, il tirante Tipo A non è idoneo, in quanto nell'iniezione di secondo tempo la camicia non si rompe e quindi non si formano le sbulbature. Tale possibilità deve essere attentamente vagliata in fase di progettazione e di scelta del tirante, poiché l'impossibilità di realizzare le sbulbature ha drammatici effetti sul tiro limite del tirante e, quindi, sulla reale possibilità di un efficace ancoraggio dell'opera di sostegno.

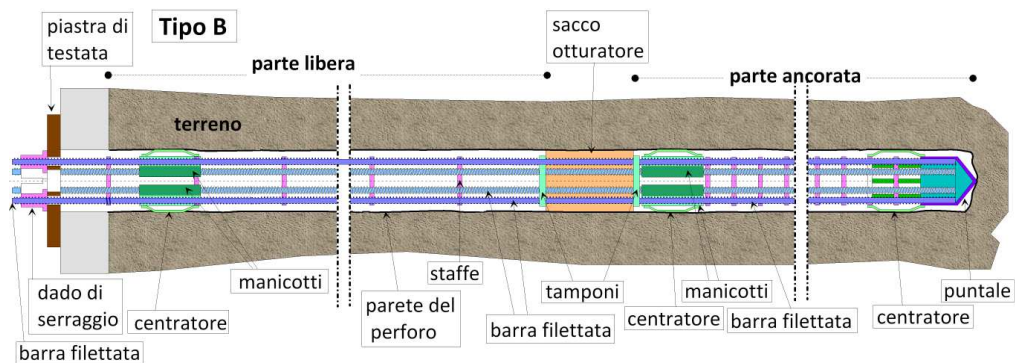


Figura 5.6 b: Sezione longitudinale del tirante tipo B



Quando questa impossibilità sia stata individuata in fase progettuale, attraverso la realizzazione di tiranti di prova, si può ricorrere al tipo B, (figura 5.6 b) il quale gode delle stesse prerogative del tipo A, circa la durabilità, la resistenza e la facilità di installazione e trasporto.

Il tirante tipo B si differenzia dal tipo A per avere le barre prive dei tubi-guaina, oltre che nel tratto di ancoraggio anche nel tratto libero, e per disporre di un sacco otturatore in tessuto non tessuto (TNT) della lunghezza di circa 2 m.

Il sacco, che separa la zona ancorata da quella libera, è sigillato ai due lati con un tampone di mastice speciale e dispone di propri tubi di iniezione e di sfiato, al pari della zona di ancoraggio. Tale otturatore viene iniettato prima del tratto di fondazione e, gonfiandosi, aderirà alle pareti del perforo occludendolo ed isolando la zona di fondazione.



Figura 5.7: Sacco otturatore in tessuto non tessuto TNT

Dopo che il foro è stato pulito dei detriti ed il tirante è stato installato nel perforo, si procede all'iniezione del sacco otturatore, che avviene a basse pressioni (2-4 atm) e con una certa lentezza per salvaguardarne l'integrità; in tal modo l'acqua contenuta nella miscela potrà permeare le pareti del sacco, dando luogo ad una presa più rapida e ad un migliore effetto di serraggio del sacco sulle pareti del perforo. Dopo che la miscela ha subito il necessario

indurimento, si procede all'iniezione del bulbo sotto pressione di 10-30 atm, utilizzando miscela con additivi antiritiro e con rapporto acqua/cemento da 1/1.5 a 1/2. L'operazione di tesatura delle barre sarà eseguita con le stesse modalità previste per il tirante tipo A.

### 5.4.3 Piastra di testata

Completata la maturazione della miscela di iniezione secondaria, si procede alla tesatura delle barre di composito, in modo da realizzare il tiro previsto in progetto.

A questo punto sarà installata la testata di ancoraggio (figura 5.8), la quale, in questa fase di proposizione del tirante, è ancora in acciaio. In rapporto alla possibilità di corrosione, essa soffre, infatti, di minori pericoli in quanto non è celata alla vista e può essere controllata e protetta con continuità.

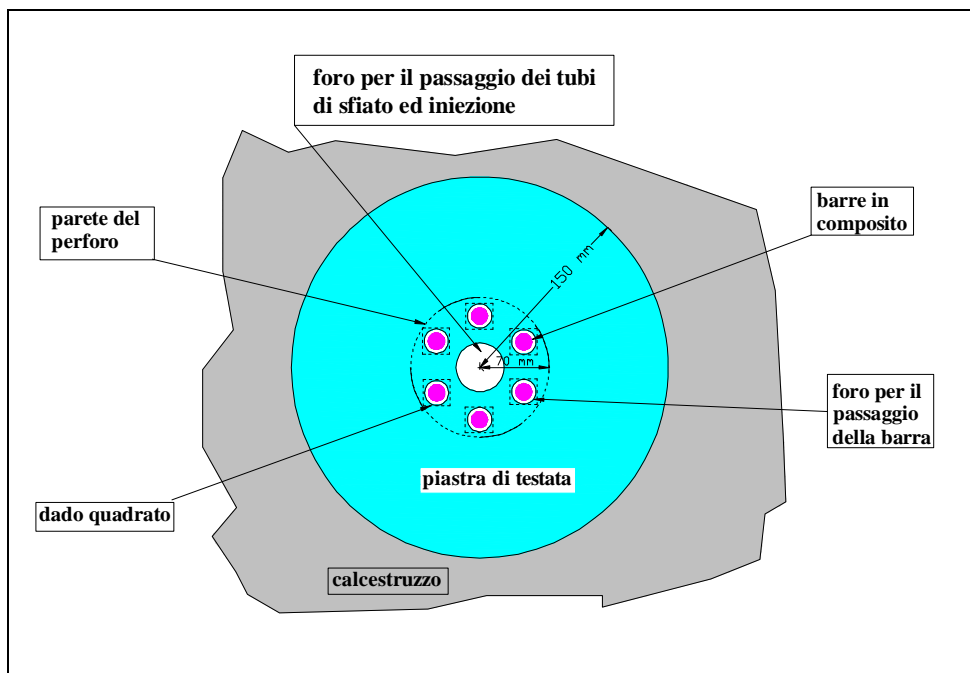


Figura 5.8: Vista della piastra di testata

La piastra è dotata di un foro centrale, attraverso cui fuoriesce il tubo centrale di iniezione, ed una serie di fori laterali, da cui fuoriescono le barre filettate. Queste ultime sono contrastate sulla piastra attraverso dadi di serraggio dotati di guarnizioni, i quali vengono avvitati alle barre filettate (figure 5.6 a e b). La misura del tiro nella barra può essere effettuata per misura dell'allungamento della barra stessa durante l'operazione di avvitamento, oppure con l'uso di contagiri. È comunque consigliabile l'uso di celle di carico (fig. 5.9), almeno come mezzo di controllo campionario.

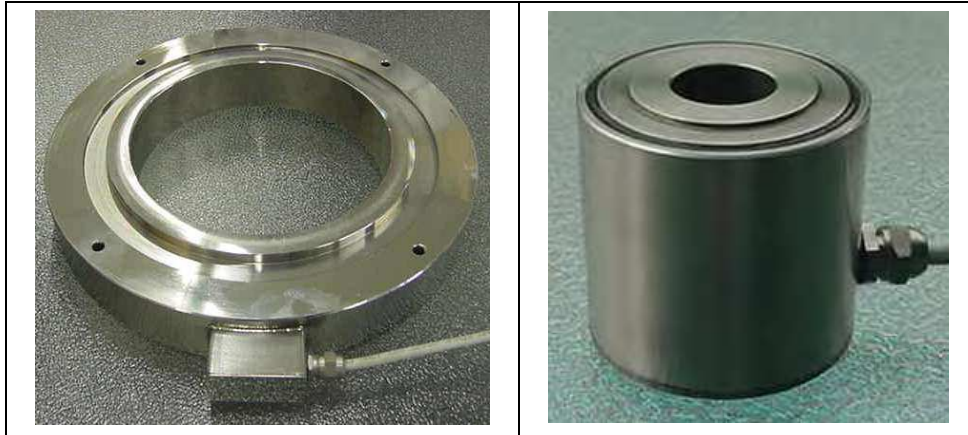


Figura 5.9: Celle di carico

### 5.5 Calcolo della capacità portante

Nella vigente Normativa Tecnica Italiana [7], i tiranti vengono distinti in relazione alla modalità di sollecitazione in passivi, quando la sollecitazione di trazione nasce quale reazione a seguito di una deformazione dell'opera ancorata, e attivi, quando la sollecitazione di trazione è impressa all'atto del collegamento all'opera ancorata.

In relazione alla durata di esercizio, i tiranti vengono inoltre distinti in provvisori, se la loro funzione si esplica per un periodo di tempo limitato e definito a priori e permanenti, quando la loro funzione deve essere espletata per un periodo di tempo commisurato alla vita utile della struttura ancorata.

Nelle verifiche di sicurezza, da eseguirsi sempre secondo la [7], gli stati limite ultimi da considerare si riferiscono allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno e dal raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali (barre) che li compongono.

Si dovranno quindi effettuare due specifiche verifiche, la prima con lo scopo di dimensionare il bulbo terminale di ancoraggio in funzione delle caratteristiche geotecniche del terreno e della massima azione di progetto, la seconda per la verifica degli elementi strutturali che compongono il sistema di ancoraggio, quindi in particolare le barre utilizzate.

Dovrà inoltre verificarsi che la resistenza caratteristica ultima del tratto libero delle barre sia sempre maggiore della resistenza a sfilamento della fondazione dell'ancoraggio, garantendo che il raggiungimento della condizione limite e quindi la rottura dell'ancoraggio si abbia per sfilamento della parte iniettata e non per rottura della barra.

Da quest'ultima condizione deriva che il tratto di fondazione dell'ancoraggio sarà dimensionato in base alla resistenza della barra e non in base all'azione agente. Di ciò dovrà tenersi conto evitando un sovradimensionamento eccessivo del cavo, che si rifletterà su un sovradimensionamento ancor maggiore dell'ancoraggio.

Tralasciando l'aspetto relativo alla lunghezza del bulbo iniettato ed allo scopo di fornire indicazioni sulla portata del prototipo di tirante, si valuterà la capacità portante con riferimento sia a barre di CFRP che di GFRP, considerando per esse i valori medi di resistenza garantita a trazione di barre disponibili in commercio e oggetto delle sperimentazioni condotte presso il Laboratorio di Prove Materiali e Strutture dell'UNICAL, nell'ambito dello stesso lavoro di tesi.

La resistenza di calcolo del materiale, data da:

$$R_d = R / \gamma_F$$

verrà valutata, come già detto, utilizzando il valore della resistenza garantita a trazione, mentre per il coefficiente parziale di sicurezza  $\gamma_F$  delle barre si assumerà il valore 1,5 come indicato dalla [2]. Ipotizzando di utilizzare 6

barre di diametro  $\Phi 12$  mm, ciascuna di area  $A(\Phi 12)=113,04 \text{ mm}^2$ , si può determinare la resistenza di progetto del tirante, pari a:

$$R_{d,t} = R_d \cdot 6 \cdot A(\Phi 12)$$

I valori calcolati sia per le barre di CFRP che per quelle di GFRP, sono indicati nella tabella 5.1, nella quale è inserita anche la resistenza di progetto di un tirante armato con 3 trefoli di acciaio armonico, ciascuno realizzato con 7 fili del diametro  $\Phi 5$  per un diametro complessivo del singolo trefolo pari a  $\Phi 15$  mm ed area complessiva pari ad  $A = 137 \text{ mm}^2$  a trefolo. Sempre nella tabella 5.1, per resistenza a trazione dell'acciaio armonico si intende, come da normativa [7], la tensione caratteristica all'1% di deformazione pari, per i trefoli, ad almeno  $1670 \text{ N/mm}^2$ , mentre il coefficiente parziale di sicurezza  $\gamma_s$  per l'acciaio vale 1,15.

Nell'ultima colonna della tabella 5.1 è indicato il peso della sola armatura (barre di FRP o trefoli in acciaio).

Tabella 5.1: Capacità portante del tirante

<b>Materiale</b>	<b>N.ro barre/trefoli-diametro</b>	<b>R [MPa]</b>	<b>R<sub>d</sub> [MPa]</b>	<b>R<sub>d,t</sub> [KN]</b>	<b>Peso delle barre/trefoli [N/ml]</b>
CFRP	6 $\Phi 12$	1200	800	542	10,8
GFRP	6 $\Phi 12$	800	533	361	12,2
Acciaio armonico	3 $\Phi 15$	1670	1452	606	32,4

Come può notarsi i valori di portata sono considerevoli, soprattutto per le barre in fibra di carbonio, a fronte di una notevole riduzione di peso delle sole barre. Un'ulteriore diminuzione del peso proprio del tirante si realizza grazie all'assenza del calcestruzzo di riempimento, che diventa assolutamente necessario nel tirante tradizionale per garantire la protezione delle armature d'acciaio dall'ossidazione. Nel prototipo in oggetto, invece, il riempimento della zona libera con malta cementizia avverrà alla fine delle operazioni di

iniezione della miscela in pressione del bulbo ed al solo scopo di richiudere il foro realizzato nel terreno.

Considerando l'incidenza di peso degli altri elementi che costituiscono il tirante, il prototipo di tirante progettato consente di ottenere, a parità di diametro, un peso pari al massimo al 10% di quello di uno analogo tradizionale prefabbricato, il cui peso, per i tiranti disponibili in commercio, è in media pari a circa 250 N/ml.

La tabella 5.1 fornisce valori di massima della capacità portante dei tiranti, che vanno poi verificati in sede di progetto, tenendo conto di tutte le ulteriori indicazioni progettuali e limitazioni fornite dalla normativa [2-7-8] e delle prove di carico che dovranno eseguirsi.

Per quanto riguarda il fenomeno del creep, in base ai risultati delle prove ad oggi eseguite, si può ritenere che, affinché le deformazioni viscosi non pregiudichino le caratteristiche meccaniche delle barre in composito, è necessario che i carichi applicati non superino il 60% del carico di rottura.

Il coefficiente di sicurezza  $\gamma_F$  adottato per effettuare il calcolo della portata massima in tabella 5.1, equivale ad assumere per il tirante un carico di esercizio pari all'incirca al 60% di quello a rottura. Pertanto, a questi livelli di carico sicuramente la rottura per creep non sarà un problema per i tiranti provvisori, quelli cioè destinati ad un uso limitato nel tempo, e non costringerà ad adottare ulteriori misure cautelative per il calcolo delle tensioni di lavoro. E ciò sia per i tiranti realizzati con barre di GFRP ed ancor di più per quelli che utilizzano barre in CFRP, che presentano una resistenza al creep ancora maggiore del vetro.

Tali argomenti saranno comunque tenuti in debita considerazione nella fase di progettazione esecutiva del tirante, seguendo le indicazioni normative a riguardo.

## 5.6 Ulteriori sviluppi

Il tirante con le caratteristiche sopra illustrate dovrà essere sottoposto ad una serie di prove di controllo che consentano di verificare appieno la rispondenza del prototipo alle attese progettuali, individuare i punti deboli per avere la possibilità di apportare le necessarie modifiche e valutare i parametri di

utilizzo nella progettazione. In particolare, si dovrà verificare l'efficacia dei manicotti, quali mezzo di collegamento delle barre e di trasmissione dei tiri, e l'aderenza tra barre filettate e miscela, per stabilire le lunghezze di ancoraggio. In questo ambito, si valuterà anche la possibilità di usare barre prive di filettatura, ma con superfici più scabre, come quella riportata nella figura 5.10, in cui filamenti di fibra sono avvolti ad elica attorno alla sezione.



Figura 5.10: Barra in GFRP con superficie scabra

Inoltre, un ulteriore futuro obiettivo potrebbe essere la progettazione della piastra di testata anch'essa in materiale composito, anziché in acciaio come previsto allo stato attuale.

### 5.7 Considerazioni conclusive

Con la presente applicazione si è ideato un prototipo di tirante, utilizzabile per l'ancoraggio di opere di contenimento, la cui caratteristica principale è rappresentata dall'impiego di barre di materiale composito fibrorinforzato FRP in fibre di vetro o di carbonio, in sostituzione delle tradizionali barre di armatura, generalmente costituite da cavi di acciaio armonico ad alta resistenza. Ma i cavi di acciaio armonico, pur presentando una elevata

resistenza, sono però estremamente sensibili ai fenomeni corrosivi, che riducono l'efficacia del materiale e, quindi, la vita utile del tirante.

L'uso degli FRP rispetto ad un tradizionale rinforzo in acciaio, consente di ridurre notevolmente sia i costi di installazione e movimentazione, grazie all'estrema leggerezza, che quelli di manutenzione nel tempo, grazie alla maggiore durabilità.

Le due varianti del prototipo sviluppate, che si differenziano per la modalità di installazione, a seconda delle condizioni del terreno su cui dovrà operarsi, sono idonee a realizzare tiranti sia di tipo provvisorio, cioè con un impiego limitato nel tempo, che definitivi, cioè progettati per resistere per tutta la vita utile dell'intera opera, considerati anche i valori della capacità portante che tali tiranti possono garantire.

Le ridotte dimensioni dei singoli componenti strutturali, rende molto agevole il trasporto dei componenti disassemblati e rende conveniente eseguire in cantiere l'assemblaggio, che consiste essenzialmente in operazioni di giunzione con manicotti e di incollaggio delle singole parti strutturali con resine.

A questo punto resta, però, da attuare la fase di sperimentazione del prototipo, con la quale si dovrà confermare l'efficacia di alcuni particolari costruttivi, per consentire di verificare la piena rispondenza del prototipo alle attese progettuali. Tutto ciò potrà costituire oggetto di futura ricerca.



## CAPITOLO 6

### *Conclusioni*

Il lavoro di ricerca illustrato nella presente tesi ha avuto come obiettivo principale la caratterizzazione a lungo termine di barre in materiale composito rinforzato con fibre di vetro (GFRP) sottoposte a carico costante di trazione, al fine di indagare sul fenomeno del creep.

Il primo problema che è stato affrontato nella definizione della procedura sperimentale è stato quello dell'ideazione di un nuovo dispositivo di afferraggio dei provini, considerato che quello suggerito dalle norme [2,4] non garantiva il successo della prova.

Alla identificazione del dispositivo ottimale, rappresentato nella figura 6.1,

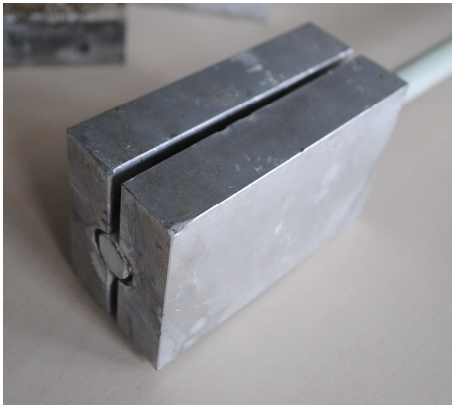


Figura 6.1: Dispositivo di ancoraggio

si è arrivati dopo successive modifiche e numerose prove di trazione e di creep, eseguite su campioni di barre, che fallivano per lo slittamento degli ancoraggi prima che la barra potesse sviluppare la resistenza massima.

Anche le successive prove di creep sono state lunghe ed impegnative e l'insuccesso di qualcuna di esse pregiudicava il lavoro di diverse settimane, senza, per fortuna, intaccare l'entusiasmo profuso nello svolgimento della ricerca.

La programmazione delle prove, soprattutto quando l'impiego di macchinari ed attrezzature era previsto per lunghi periodi, doveva avvenire di concerto con l'organizzazione di tutte le altre attività del Laboratorio del Dipartimento di Strutture. E ciò ha evidentemente condizionato l'esecuzione di alcune prove.

Le prove di creep sono state svolte a temperatura ambiente con 4 livelli del carico, pari rispettivamente all'80%, 70% , 60% e 50% del carico medio di rottura a trazione delle barre stesse, che è stato determinato sperimentalmente, in una campagna preliminare finalizzata alla caratterizzazione meccanica delle barre.

Sono state eseguite diverse prove di creep per ogni livello del carico preso in considerazione, su barre di GFRP aventi sempre lo stesso diametro ( $\phi$  14), considerato che la resistenza a trazione per i materiali compositi varia anche in funzione del diametro, a causa dello scorrimento lento da taglio che si verifica tra le fibre nelle sezioni più grandi (size effect).

Le prove effettuate hanno evidenziato la tendenza al comportamento viscoso dei compositi fibrorinforzati studiati.

I risultati mostrano che le barre esibiscono una marcata deformazione da creep, quando i valori di carico sono maggiori o uguali al 70% del limite di resistenza a trazione delle barre stesse. In tali casi si verifica la rottura della barra, in tempi variabili a seconda del carico applicato.

Il comportamento a creep delle barre è descritto nei grafici deformazione-tempo delle figure seguenti 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5, che riassumono i risultati delle prove effettuate ai vari livelli di carico.

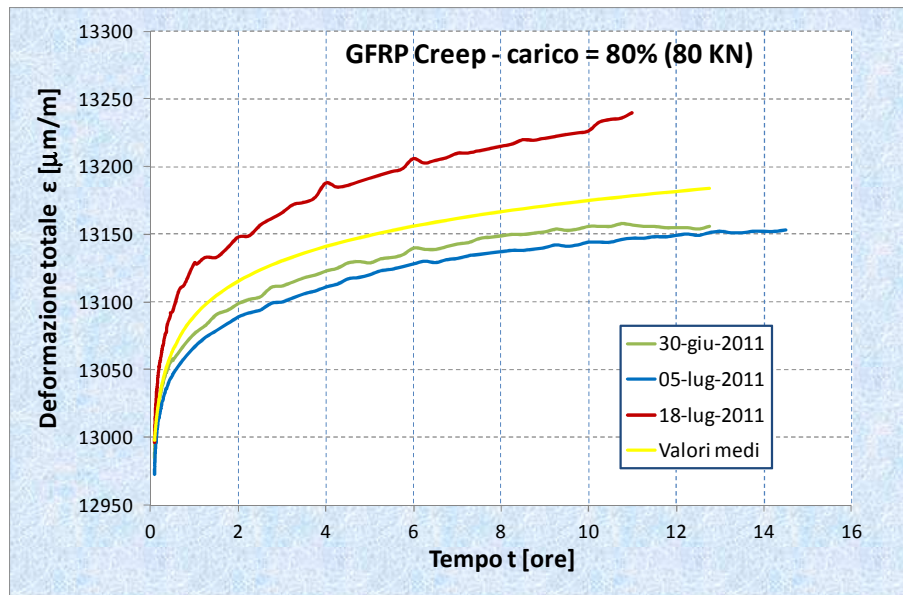


Figura 6.2: Diagramma ( $\epsilon,t$ ) di confronto prove di creep con carico all'80%

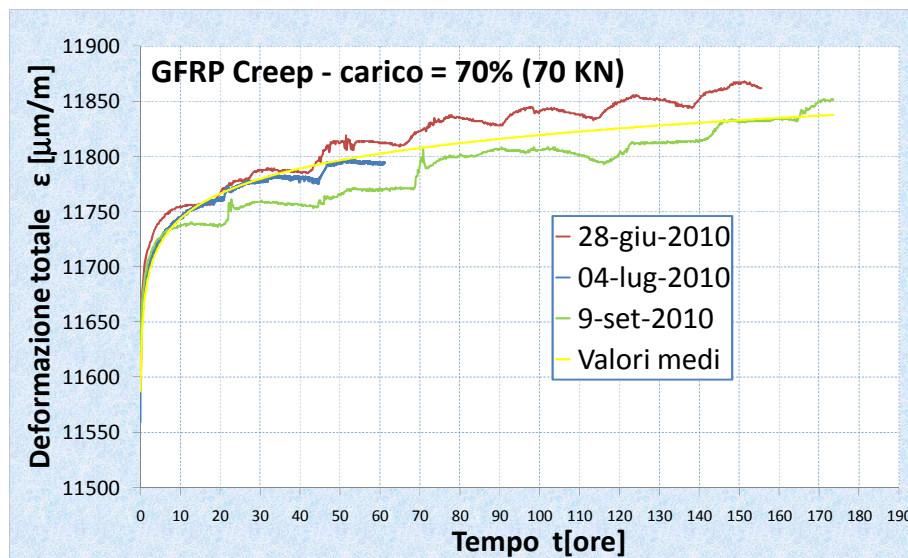


Figura 6.3: Diagramma ( $\epsilon,t$ ) di confronto prove di creep con carico al 70%

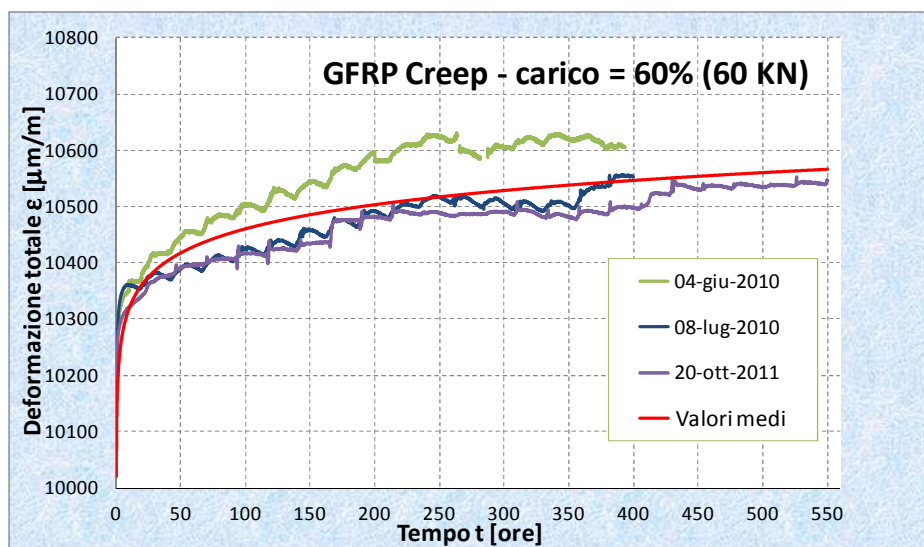


Figura 6.4: Diagramma ( $\epsilon,t$ ) di confronto prove di creep con carico al 60%

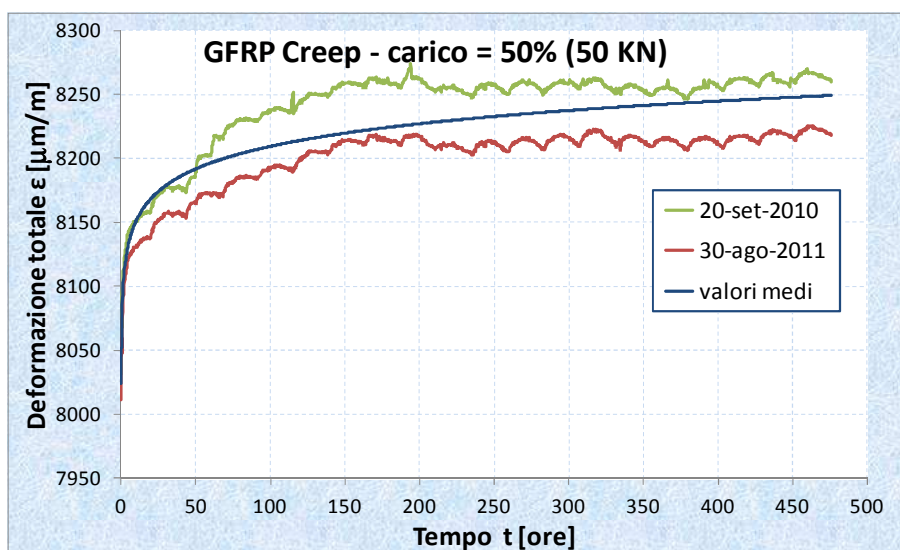


Figura 6.5: Diagramma ( $\epsilon,t$ ) di confronto prove di creep con carico al 50%

Applicando la teoria di Findley, descritta nel capitolo 2, per ciascuna curva è stata ricavata l'equazione della curva interpolante, che ha una espressione del tipo:

$$\varepsilon(t) = a t^b$$

e che fornisce al tempo  $t$  (espresso in ore) la deformazione totale  $\varepsilon$  (misurata in  $\mu\text{m/m}$ ) esibita dalle barre, comprensiva della deformazione elastica istantanea  $\varepsilon_0$ , registrata al raggiungimento in ciascuna prova del carico costante di creep.

Gli esperimenti condotti nell'ambito della presente ricerca hanno dimostrato che la teoria di Findley è appropriata a descrivere il comportamento viscoelastico delle barre in composito fibro-rinforzato studiate, quando le stesse sono soggette ad un carico di trazione costante, applicato in direzione longitudinale.

La Tabella 6.1 riassume i valori medi dei parametri di creep per ogni livello del carico considerato.

In particolare in essa sono stati indicati: la deformazione elastica istantanea  $\varepsilon_0$ , i coefficienti  $a$  e  $b$  dell'equazione della curva interpolante ed il tempo di rottura  $t_r$ .

Tabella 6.1: Parametri di creep

Valore del carico	$\varepsilon_0$ [ $\mu\text{m/m}$ ]	$a$	$b$	$t_r$ [h]
80%	12985	13090	0,0028	12,75
70%	11595	11668	0,0028	130
60%	10190	10180	0,0056	---
50%	8021	8093	0,0031	--

Mentre con i valori più alti del carico (80 e 70%) si è sempre verificata la rottura delle barre, la stessa cosa non è successa nelle prove con carico minore (60 e 50%) con durata delle prove di circa 500 ore. Dal grafico di figura 6.5 relativo alle prove di creep con carico al 50% di quello a rottura, si evince ancora che, pur essendosi verificata la fase del creep primario, dopo circa 150 ore dall'inizio della prova le barre non mostravano più una spiccata tendenza all'aumento della deformazione, la quale oscillava su valori pressoché costanti, come se, dopo tale periodo, il fenomeno del creep si fosse quasi esaurito.

Una parte della ricerca è stata, infine, dedicata al progetto di un prototipo di tirante d'ancoraggio realizzato con barre di FRP e che è stato illustrato nel capitolo 5. Esso, sfruttando le caratteristiche e le qualità superiori proprie dei materiali FRP, può rappresentare una valida alternativa, in termini di resistenza alla corrosione, peso e capacità portante, ai tradizionali tiranti realizzati con armatura costituita da cavi in acciaio armonico.

Sono stati ideati due diversi tipi di tirante, i quali riprendono tipologie già in uso ed ampiamente sperimentate, sia pure limitatamente all'impiego di trefoli in acciaio armonico e che si differenziano per la modalità di installazione, a seconda delle condizioni del terreno su cui dovrà operarsi.

Una ulteriore caratteristica del prototipo è data dalle ridotte dimensioni dei singoli componenti strutturali, che rende molto agevole il trasporto dei componenti disassemblati e rende conveniente eseguire in cantiere l'assemblaggio, che consiste essenzialmente in operazioni di giunzioni con manicotti e di incollaggio delle singole parti strutturali con resine.

Essendosi conclusa la fase progettuale, è nelle intenzioni future di avviare la fase di sperimentazione, che dovrà confermare l'efficacia di alcuni particolari costruttivi, per consentire di verificare la piena rispondenza del prototipo alle attese progettuali.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] CNR-DT 200/2004, “*Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l’utilizzo di Compositi Fibrorinforzati*”. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, Italia, 2004.
- [2] CNR-DT 203/2006, “*Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Armato con Barre di Materiale Composito Fibrorinforzato*”. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, Italia, 2006.
- [3] ACI 440.2R-02, “*Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*”, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, USA, 2002.
- [4] ACI 440.3R-04, “*Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*”, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, USA, 2004.
- [5] ACI 440.1R-06 “*Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars*” American Concrete Institute, Detroit, Michigan, USA, 2006.
- [6] Canadian Standards Associations (CSA), “*Canadian Highways Bridge Design Code, Section 16, Fiber reinforced structures*”, 1996.
- [7] D. M. 14 gennaio 2008, “*Approvazione delle nuove Norme Tecniche per le costruzioni*”, G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008, 6.6
- [8] UNI EN 1537:2002, “*Esecuzione di lavori geotecnici speciali - Tiranti di ancoraggio*”, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia, 2002.
- [9] W. N. Findley, “*26-year creep and recovery of poly(vinyl chloride) and polyethylene*”, *Polym. Eng. Sci.*, 27 (8), 582-585,1987.

- [10] Olivito R., “*Applicazioni NDT per la stima del danno in materiali compositi FRP*”, Atti della giornata di studio 11 Ottobre 1996, Cosenza.
- [11] Olivito R.S., Salatino G., Venneri A., Zuccarello F.A. “*Procedura sperimentale per lo studio del comportamento viscoso di barre di FRP*”. Atti del XXXVIII Convegno Nazionale AIAS, 9-11 settembre 2009, Politecnico di Torino.
- [12] Greco V. R., Olivito R. S., Salatino G., “Progetto di un tirante realizzato con barre di FRP” Atti del XXXIX Convegno Nazionale AIAS, 7-10 settembre 2010, Maratea.
- [13] Ascione L., Berardi V.P. “*Gli effetti reologici nel placcaggio strutturale di elementi in c.a. con laminati fibrorinforzati*”. XVI AIMETA Congress of Theoretical and Applied Mechanics, CD-ROM Proceeding; 2003.
- [14] Ascione L., Berardi V.P., Feo L., Giordano A., “*Indagine sperimentale sul comportamento viscoso di laminati pultrusi in fibra di carbonio*”, XVII Congresso AIMETA, CD-ROM Proceeding; 2005.
- [15] Ascione F., Berardi V.P., Feo L., Giordano A. “*On the creep behavior of CFRP pultruded laminates: an experimental study*”, the Second fib Congress, Naples, 2006.
- [16] Ascione F., Berardi V.P., Feo L., Giordano A., “*Il fenomeno del creep nel placcaggio strutturale con FRP: progettazione di un dispositivo sperimentale*”, XIV Convegno Nazionale ADM-XXXIII AIAS, Bari 2004.
- [17] Ascione L., Feo L., Mancusi G., “*On the statical behaviour of Fibre-Reinforced Polymer Thin-Walled Beams*”, Composites: part B, Vol. 31,8,2000, pp. 643-654.
- [18] Berardi V.P., Giordano A., Mancusi G., “*Modelli costitutivi per lo studio della viscosità nel placcaggio strutturale con FRP*”, XXXII Convegno Nazionale AIAS, Salerno 2003.



- [19] Dutta PK, Hui D. , “*Creep study of FRP composite rebars for concrete*”, Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Australia, 14-16 July 1997.
- [20] C.C.M. Ma, N.H. Tai, S.H. Wu, S.H. Lin, J.F. Wu, J.M. Lin, “*Creep behaviour of carbonfiber-reinforced PEEK [+/-45] laminated composites*”, *Composites: Part B*, 28, 407-417, 1997.
- [21] P. K. Dutta, D. Hui, “*Creep rupture of a GFRP composite at elevated temperatures*”, *Computers and structures*, 2000.
- [22] Maksimov R.D., Plume E. “*Long-Term creep of hybrid aramid/glass fiber-reinforced Plastics*”. *Mechanics of Composite Materials* 2001;37(4).
- [23] Petermann J., Schulte K. “*The effects of creep and fatigue stress ratio on the longterm behavior of angle-ply CFRP*”. *Composite Structures* 2002; 57:205–10.
- [24] Nkurunziza G., Benmokrane B., Debaiky A.S., Masmoudi R. “*Effect of creep and environment on long-term tensile properties of glass FRP reinforcing bars*”. 4th International Conference on advanced composite materials in bridges and structures, Calgary, Alberta, 2004.
- [25] Nkurunziza G., Debaiky A.S., Cousin P., Benmokrane B., “*Durability of GFRP bars: a critical review of the literature*” *Prog struct engng materials*, vol. 7, 2005.
- [26] Gasparri R., Merloni R. “*Procedura di analisi del danneggiamento da creep di laminati in composito*” IX Convegno Nazionale Gruppo Italiano Frattura, Roma 2-4 Giugno 1993.
- [27] Giannopoulos I. P., Burgoyne C. J. “*Viscoelasticity of Kevlar 49 fibres*” 16a Conferenza su calcestruzzo, ETSC, 21-23 Ottobre 2009, Paphos, Cipro

- [28] Giannopoulos I. P., Burgoyne C. J. “*Stress Limits for Aramid Fibres*” Structures and Buildings 162 (2009), 221-232
- [29] Ceroni F., Cosenza E., Gaetano M., Pecce M., “*Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members*” Cement & Concrete Composites 28 , 857-868. (2006)
- [30] Raghavan J., Meshii M., “*Creep rupture of polymer composites*” Composites Science and Technology 57 , 357-388 (1997)
- [31] Yamaguchi T., Kato Y., Nishimura T., Uomoto T. “*Creep rupture of FRP rods*”. In: proc 3<sup>rd</sup> Int Symposium FRPRCS-3 JCI, vol. 2, 1997
- [32] Paired A., Fatemi A., “*Tensile creep and deformation modeling of Vinyl Ester Polymer and its nanocomposite*” Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 28, N. 14/2009



