

**CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE**

COMMISSIONE INCARICATA DI FORMULARE PARERI IN MATERIA  
DI NORMATIVA TECNICA RELATIVA ALLE COSTRUZIONI

**Istruzioni**  
**per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo**  
**di Strutture di Calcestruzzo**  
**armato con Barre di**  
**Materiale Composito Fibrorinforzato**



**VERSIONE SOTTOPOSTA AD INCHIESTA PUBBLICA**  
**FINO AL 31 MAGGIO 2006**

**CNR-DT 203/2006**

**Proprietà letteraria riservata**  
**del**

**Consiglio Nazionale delle Ricerche**

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>2</b>
2.1	SIMBOLOGIA .....	3
<b>3</b>	<b>MATERIALI .....</b>	<b>5</b>
3.1	TECNICHE DI PRODUZIONE .....	5
3.2	CARATTERISTICHE DELLE BARRE DI FRP .....	5
3.2.1	Proprietà geometriche .....	5
3.2.2	Resistenza e modulo di elasticità a trazione in direzione longitudinale (asse delle barre) .....	5
3.2.3	Coefficienti di dilatazione termica .....	6
3.2.4	Fatica statica .....	7
3.2.5	Aderenza barra-calcestruzzo .....	7
3.3	CARATTERISTICHE DELLE GRIGLIE DI FRP .....	7
3.4	SCHEDE TECNICHE PER LE BARRE DI FRP .....	8
3.5	QUALIFICAZIONE .....	8
3.6	ACCETTAZIONE .....	9
<b>4</b>	<b>CONCETTI BASILARI DEL PROGETTO .....</b>	<b>10</b>
4.1	REQUISITI FONDAMENTALI .....	10
4.2	VITA UTILE DELLA STRUTTURA .....	10
4.3	REQUISITI DI DURABILITÀ .....	10
4.4	PRINCIPI GENERALI DEL PROGETTO DI RINFORZO .....	10
4.4.1	Generalità .....	10
4.4.2	Azioni di calcolo .....	11
4.4.3	Proprietà dei materiali .....	11
4.4.4	Capacità resistente di calcolo .....	12
4.5	COEFFICIENTI PARZIALI .....	12
4.5.1	Coefficienti parziali $\gamma_m$ per i materiali .....	12
4.6	PROBLEMI SPECIALI DI PROGETTO E RELATIVI FATTORI DI CONVERSIONE .....	12
4.6.1	Azioni ambientali e fattore di conversione ambientale $\eta_a$ .....	12
4.6.2	Modalità di carico e fattore di conversione per effetti di lunga durata $\eta_l$ .....	13
4.7	FLESSIONE .....	14
4.7.1	Generalità .....	14
4.7.2	Analisi del comportamento agli stati limite ultimi .....	14
4.7.2.1	Fondamenti del calcolo .....	14
4.7.2.2	Valutazione del momento resistente .....	14
4.7.2.3	Armatura minima .....	16
4.7.3	Analisi del comportamento agli stati limite di esercizio .....	16
4.7.3.1	Fondamenti del calcolo .....	16
4.7.3.2	Verifica delle tensioni .....	17
4.7.3.3	Verifica delle frecce .....	17
4.7.3.4	Verifica dell'apertura delle fessure .....	19
4.8	TAGLIO .....	20
4.8.1	Generalità .....	20
4.8.2	Fondamenti del calcolo .....	21
4.8.2.1	Elementi senza armature trasversali resistenti a taglio .....	21

4.8.2.2	Elementi con armature trasversali resistenti a taglio.....	21
4.8.3	Armatura minima.....	22
4.9	ARMATURA SECONDARIA CON FRP .....	22
4.10	LUNGHEZZA DI ANCORAGGIO .....	22
4.11	PARTICOLARI COSTRUTTIVI.....	22
<b>5</b>	<b>APPENDICE A (SULLE TECNICHE DI PRODUZIONE DELLE BARRE) .....</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>APPENDICE B (SULLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DELLE BARRE DI FRP) .....</b>	<b>27</b>
6.1	DETERMINAZIONE DELLE PROPRIETÀ GEOMETRICHE.....	27
6.2	DETERMINAZIONE DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE.....	27
<b>7</b>	<b>APPENDICE C.....</b>	<b>30</b>
7.1	SCHEDE TECNICA TIPO PER LE BARRE DI FRP.....	30
7.2	QUALIFICAZIONE DI LIVELLO 1 : PROPRIETÀ FISICO-MECCANICHE .....	31
7.3	QUALIFICAZIONE DI LIVELLO 2 : PROPRIETÀ A LUNGO TERMINE .....	31
<b>8</b>	<b>APPENDICE D.....</b>	<b>33</b>
8.1	COMPITI E RESPONSABILITÀ DEGLI OPERATORI NELLA SCELTA E NEL CONTROLLO DELLE BARRE DI FRP.....	33
<b>9</b>	<b>APPENDICE E (SUL CALCOLO DELLA FRECCIA E DELL'APERTURA DELLE FESSURE IN ELEMENTI INFLESSI DI CALCESTRUZZO ARMATO CON BARRE DI FRP) .....</b>	<b>35</b>

## 1 PREMESSA

Il presente documento va ad arricchire la collana dei documenti editi recentemente dal CNR sull'uso strutturale dei materiali compositi fibrorinforzati (FRP), nata con la pubblicazione del CNR-DT 200/2004. I documenti finora apparsi hanno avuto per oggetto, nell'ordine, il placcaggio con FRP di strutture di calcestruzzo armato ordinario o precompresso e di strutture murarie (CNR-DT 200/2004), il placcaggio di strutture lignee (CNR-DT 201/2005) e quello di strutture metalliche (CNR-DT 202/2005). L'argomento del presente documento è invece l'impiego di barre di FRP come armatura di getti di calcestruzzo cementizio.

L'uso dei materiali compositi fibrorinforzati in sostituzione dell'acciaio, per la realizzazione di elementi strutturali di calcestruzzo, costituisce una pratica ormai diffusa in molti Paesi del mondo. La peculiare caratteristica degli FRP di non essere suscettibili ai fenomeni di corrosione rende tale impiego particolarmente vantaggioso in svariate situazioni.

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

Dal punto di vista teorico non emergono differenze concettuali rispetto alla tradizionale teoria del calcestruzzo armato con barre di acciaio. Ciò che soprattutto va tenuto in conto è il diverso comportamento meccanico degli FRP, il cui legame costitutivo è essenzialmente elastico-lineare fino a rottura.

Le Istruzioni e/o Linee guida attualmente disponibili in lingua inglese sono riconducibili a cinque documenti: nell'ordine, dal più recente a quello più datato, si citano innanzitutto il documento edito dal *fib* (Task Group 9.3, 2005) e quello edito dall'*American Concrete Institute* (ACI 440.1R-03, 2003); quindi i due documenti pubblicati in Canada (CAN/CSA-S6-00, 2000 per ponti, e CAN/CSA-S6-02, 2002 per edifici) ed infine il documento giapponese (JSCE, 1997).

I riferimenti bibliografici completi sono i seguenti:

- ACI 440.1R-03, 2003, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars", *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI, USA;
- CAN/CSA-S6-00, 2000, "Canadian High Bridge Design Code," Clause 16.8.6, Canadian Standard Association (CSA) International, Toronto, Ontario, Canada;
- CAN/CSA-S6-02, 2002, "Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers," CAN/CSA S806-02, Canadian Standards Association, Rexdale, Canada;
- *fib*, 2005, "FRP Reinforcement for RC Structures", Task Group 9.3 (*Fibre Reinforced Polymer*) Reinforcement for Concrete Structures, Lausanne, Switzerland;
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 1997, "Recommendation for Design and construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials", *Concrete Engineering Series No. 23*, Tokyo, Japan.

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

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

Principalmente, i materiali compositi a base di fibre di vetro (GFRP) non sono conduttori. Ne risulta che l'impiego delle barre di GFRP, come armature di elementi esposti a correnti vaganti, di fatto risolve il problema della corrosione che aggredisce invece le usuali armature metalliche. La presenza di correnti vaganti affligge, ad esempio, le strutture a servizio del trasporto su rotaia (linee ferroviarie o metropolitane) a cielo aperto o in galleria. Anche le solette di ponti stradali, utilizzati come cavalcavia ferroviari, possono essere interessate dallo stesso fenomeno.

In edilizia, il ricorso alla nuova tecnologia si è dimostrato particolarmente vantaggioso soprattutto per la realizzazione di impalcati di edifici per uso civile o industriale. Le ragioni che in tal caso in-

ducono alla scelta degli FRP possono essere legate non solo all'esigenza di garantire un'adeguata durabilità dell'opera, ma anche alla possibilità di avvalersi di specifiche proprietà dei compositi fibrorinforzati, quali ad esempio la trasparenza magnetica. Quest'ultima proprietà può infatti risultare utilissima in determinate circostanze, come ad esempio nella realizzazione di sale ospedaliere, allo scopo di evitare interferenze con le più moderne attrezzature per la risonanza magnetica e per la diagnostica ad immagini.

È importante che l'utilizzatore sia bene informato sui pregi e sui difetti dei materiali compositi fibrorinforzati, allo scopo di usufruire utilmente dei primi e mitigare convenientemente i secondi. Tale ultimo obiettivo è di peculiare importanza nell'ottica di garantire un'adeguata vita utile delle strutture così progettate e realizzate. Gli aspetti più rilevanti del problema saranno ben evidenziati nel prosieguo con l'indicazione delle soluzioni progettuali e/o realizzative più appropriate per fronteggiarli.

Per una esposizione più ampia ed esauriente delle proprietà costitutive e reologiche degli FRP si consiglia al lettore non esperto di consultare il già citato documento tecnico CNR-DT 200/2004 e di avvalersi di testi specializzati, ormai molto diffusi nella letteratura tecnica.

Lo scopo delle presenti Istruzioni è quello di fornire, nell'ambito della Normativa vigente, un documento di tipo orientativo per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo armato con barre di FRP: l'approccio seguito è quello del metodo semiprobabilistico agli stati limite; l'impostazione adottata, quella dei 'principi' e delle 'regole', nello stile classico degli Eurocodici.

Si richiama esplicitamente all'attenzione del lettore la circostanza che le Istruzioni, per loro genesi e natura, non sono norme cogenti ma rappresentano soltanto un ausilio offerto ai tecnici per aiutarli a filtrare, con discrezione, la copiosa bibliografia disponibile sull'argomento. A loro è comunque lasciata la responsabilità finale delle scelte operate.

Un'attenzione particolare è richiesta nel caso di applicazioni in zona sismica, laddove la quasi totale assenza di duttilità delle strutture di calcestruzzo armato con barre di FRP deve essere tenuta in debita considerazione.

Nel caso di elementi strutturali primari, cui sia affidata la funzione di fronteggiare l'azione sismica, lo spettro di progetto deve essere ricavato da quello elastico attribuendo un valore opportunamente contenuto al fattore di struttura, da assumersi prudenzialmente pari ad uno in mancanza di valutazioni più precise.

In tutti gli altri casi vanno adottati i consueti criteri di progetto, rammentando che non sono applicabili quei metodi che presuppongono una capacità di redistribuzione plastica, non garantita necessariamente dagli elementi armati con FRP.

## **2 INTRODUZIONE**

(1) Formano oggetto del presente documento le strutture di calcestruzzo con armatura lenta di FRP. Non è esclusa la possibilità che alcune delle membrature di tali strutture presentino un'armatura longitudinale di tipo tradizionale, interamente realizzata con barre di acciaio.

(2) I principi e le regole contenute nel documento non sono direttamente applicabili alle strutture precomprese con cavi di precompressione di FRP.

Applicazioni di tal genere sono state comunque già sviluppate in diversi Paesi e necessitano di verifiche specifiche soprattutto in funzione della tecnica di precompressione e dei sistemi di ancoraggio adoperati, nonché dei criteri di resistenza dei materiali, in particolare con riferimento agli effetti a lungo termine sotto stati tensionali elevati.

(3)P Di norma vanno eseguite specifiche verifiche di resistenza al fuoco degli elementi strutturali, in accordo con la vigente Normativa antincendio.

Alcune tipologie strutturali, come ad esempio le solette da ponte e più in generale quelle che non delimitano volumi chiusi all'interno dei quali possa divampare un incendio, risentono in misura limitata dei problemi di resistenza al fuoco e non richiedono specifiche verifiche.

(4) È ammesso l'utilizzo di armature piegate purché i raggi di curvatura delle piegature siano opportunamente limitati, in accordo con quanto indicato al § 4.11.

## 2.1 SIMBOLOGIA

Si riporta di seguito il significato dei principali simboli utilizzati nel documento.

### Notazioni generali

- (.)<sub>c</sub> valore della grandezza (.) riferita al calcestruzzo
- (.)<sub>d</sub> valore di progetto (o di calcolo) della grandezza (.)
- (.)<sub>f</sub> valore della grandezza (.) riferita al composito fibrorinforzato
- (.)<sub>k</sub> valore caratteristico della grandezza (.)
- (.)<sub>R</sub> valore della grandezza (.) vista come resistenza
- (.)<sub>S</sub> valore della grandezza (.) vista come sollecitazione

### Lettere romane maiuscole

- $A_c$  area della sezione di calcestruzzo, al netto delle barre
- $A_f$  area delle barre di FRP in trazione
- $A_{fw}$  area dell'armatura a taglio di FRP posta all'interasse  $s$
- $E_c$  modulo di elasticità normale del calcestruzzo
- $E_f$  modulo di elasticità normale della barra di FRP
- $E_s$  modulo di elasticità normale dell'acciaio
- $M_{Rd}$  momento resistente di progetto
- $M_{Sd}$  momento flettente sollecitante di progetto
- $R_{ck}$  resistenza cubica caratteristica a compressione del calcestruzzo
- $V_{Rd}$  resistenza di progetto a taglio dell'elemento di calcestruzzo armato
- $V_{Rd,ct}$  contributo del calcestruzzo alla resistenza di progetto a taglio
- $V_{Rd,f}$  contributo delle armature trasversali di FRP alla resistenza di progetto a taglio
- $V_{Rd,max}$  contributo della biella compressa di calcestruzzo alla resistenza di progetto a taglio
- $V_{Sd}$  taglio sollecitante di progetto

### Lettere romane minuscole

- $b$  base della sezione
- $d$  altezza utile della sezione
- $d_b$  diametro nominale della barra di FRP
- $f_c$  resistenza (cilindrica) a compressione del calcestruzzo
- $f_{cd}$  resistenza di progetto a compressione del calcestruzzo
- $f_{ck}$  resistenza cilindrica caratteristica a compressione del calcestruzzo
- $f_{ctd}$  resistenza di progetto a trazione del calcestruzzo
- $f_{fd}$  resistenza di progetto del rinforzo di FRP
- $f_{fk}$  resistenza caratteristica del rinforzo di FRP
- $h$  altezza della sezione
- $s$  passo delle staffe di FRP
- $x$  distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta

**Lettere greche minuscole**

$\gamma_m$	coefficiente parziale per materiali o prodotti
$\gamma_{Rd}$	coefficiente parziale per i modelli di resistenza
$\varepsilon_c$	deformazione del calcestruzzo al lembo compresso
$\varepsilon_{cu}$	deformazione ultima del calcestruzzo
$\varepsilon_f$	deformazione della barra di FRP
$\varepsilon_{fd}$	deformazione massima di progetto della barra di FRP
$\varepsilon_{fk}$	deformazione caratteristica a rottura per trazione della barra di FRP
$\rho_l$	rapporto di armatura per armatura longitudinale
$\sigma_c$	tensione nel calcestruzzo
$\sigma_f$	tensione nella barra di FRP
$\tau_{Rd}$	resistenza unitaria a taglio di calcolo

### 3 MATERIALI

- (1) I materiali compositi FRP presi in esame nel documento si presentano sotto forma di barre e griglie, realizzate con resine termoindurenti e fibre di vetro, carbonio o arammide.
- (2)P Le proprietà meccaniche di tali materiali dipendono principalmente dal tipo di matrice e dalla natura delle fibre, nonché dalla frazione volumetrica di queste ultime.
- (3) Sulla base delle esperienze e delle conoscenze finora acquisite, le presenti Istruzioni sono limitate all'utilizzo di barre e griglie costituite da materiali compositi fibrorinforzati con matrici termoindurenti ed una frazione volumetrica di fibre non inferiore al 50%.
- (4)P Le proprietà di aderenza delle barre di FRP con il calcestruzzo sono influenzate essenzialmente dal processo di produzione e dalle caratteristiche della loro superficie.
- (5) Nel caso delle griglie, oltre ai parametri descritti per le barre, le proprietà di aderenza dipendono anche dalle modalità con cui gli elementi della griglia sono tra loro collegati.

#### 3.1 TECNICHE DI PRODUZIONE

- (1) Le principali tecniche di produzione delle barre di FRP, nonché le tipologie più diffuse sul mercato, sono descritte nell'Appendice A.

#### 3.2 CARATTERISTICHE DELLE BARRE DI FRP

- (1)P La determinazione delle proprietà geometriche e meccaniche delle barre di composito fibrorinforzato richiede l'adozione di specifiche procedure.

##### 3.2.1 Proprietà geometriche

- (1)P In considerazione della notevole varietà delle barre commercializzate, anche in termini di geometria della sezione retta, è conveniente riferirsi ad una sezione circolare equivalente, di diametro ed area opportunamente definiti.
- (2) Una possibile procedura per la valutazione del diametro e dell'area equivalente è descritta nell'Appendice B.

##### 3.2.2 Resistenza e modulo di elasticità a trazione in direzione longitudinale (asse delle barre)

- (1)P Le barre di FRP, come altri compositi preformati, sono caratterizzate da un assetto unidirezionale delle fibre, generalmente presenti con una frazione volumetrica compresa tra il 50% e il 70%.

Tale circostanza permette di utilizzare, per barre di piccolo diametro, la regola delle miscele per la determinazione dei competenti valori delle caratteristiche meccaniche di rigidità e di resistenza.

I valori così ottenuti rappresentano tuttavia solo una stima, spesso approssimata per eccesso, dei valori effettivi. Essi, infatti, non tengono conto dell'influenza di altri importanti parametri, quali l'aderenza tra fibre e matrice, la presenza di difetti di produzione e di vuoti o anche di imperfezioni nella distribuzione o nell'allineamento delle fibre.

- (2)P Al fine di valutare in modo affidabile i valori delle proprietà meccaniche di una barra di FRP è necessario ricorrere ad adeguate sperimentazioni in modo da ottenere valori statisticamente signi-

ficativi, che tengano conto anche del livello qualitativo della relativa tecnica di produzione. I competenti valori forniti dai produttori devono perciò essere basati su criteri del tipo di quelli discussi nel § 3.5.

(3) Gli approcci disponibili in letteratura per valutare la resistenza e il modulo di elasticità a trazione delle barre in direzione longitudinale sono di due tipi: il primo si basa su prove di trazione diretta, il secondo su prove di flessione, eseguite su campioni di barra annegati in travi di calcestruzzo.

Sebbene fornisca generalmente valori della resistenza più elevati, la prova di trazione diretta è più agevole e, pertanto, viene preferita sul piano operativo. Ad essa si fa riferimento nel prosieguo e le relative modalità di esecuzione sono richiamate nell'Appendice B.

(4) I valori di resistenza e rigidezza forniti dal produttore devono riferirsi all'area equivalente della barra, come definita al § 3.2.1.

(5) Ai fini dell'impiego di cui al presente documento sono richiesti alle barre di FRP un valore caratteristico della resistenza non inferiore a 400 MPa ed un valore medio del modulo di elasticità a trazione in direzione longitudinale non inferiore a 100 GPa per le barre con fibre di carbonio, a 35 GPa per quelle con fibre di vetro ed a 65 GPa per quelle con fibre aramidiche.

### 3.2.3 Coefficienti di dilatazione termica

(1)P I coefficienti di dilatazione termica delle barre di FRP in direzione longitudinale,  $\alpha_l$ , e trasversale,  $\alpha_t$ , sono strettamente correlati a quelli delle singole fasi (matrice e fibre) che costituiscono il materiale composito.

In particolare, al crescere della frazione volumetrica delle fibre, il valore del coefficiente  $\alpha_l$  tende a quello delle fibre; in caso contrario, esso tende al valore del coefficiente di dilatazione termica della matrice.

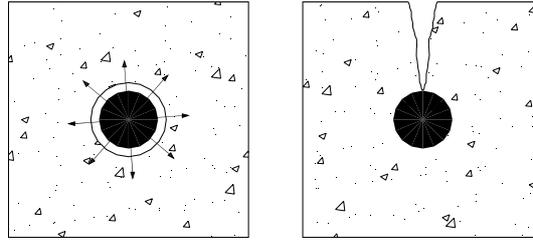
Per indicazioni più specifiche sulle proprietà termiche delle singole fasi si rinvia al documento tecnico CNR-DT 200/2004.

(2) Valori tipici del coefficiente di dilatazione termica longitudinale e di quello trasversale, rispettivamente  $\alpha_l$  ed  $\alpha_t$ , relativi a barre di composito con una frazione volumetrica di fibre compresa tra il 50% ed il 70%, sono riportati in Tabella 3-1.

**Tabella 3-1** – Coefficienti di dilatazione termica.

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

(3)P I valori elevati delle dilatazioni termiche trasversali prevedibili, unitamente all'effetto Poisson nel caso di armature compresse, possono mobilitare notevoli tensioni circonferenziali di trazione nel ricoprimento ed innescare fessure in direzione radiale (Figura 3-1).



**Figura 3-1** – Fessurazione indotta dalle tensioni circonferenziali.

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

(4) Per evitare la formazione delle suddette fessure per effetto della dilatazione trasversale o lo sfilamento delle barre per effetto della contrazione trasversale, si suggerisce di adottare un opportuno valore del ricoprimento di calcestruzzo (§ 4.11).

### 3.2.4 Fatica statica

(1)P Le armature di materiale composito fibrorinforzato sono sensibili al fenomeno della fatica statica (nota nella terminologia anglosassone come “*creep rupture*”), consistente in una progressiva diminuzione della resistenza in presenza di carichi di lunga durata.

Tale fenomeno, di natura viscosa, risulta fortemente influenzato anche da fattori di tipo ambientale, quali temperatura ed umidità.

(2) Per mitigare gli effetti della viscosità ed evitare la rottura delle barre per *creep*, è raccomandato di limitare opportunamente le tensioni di esercizio in queste ultime (§ 4.6.2).

### 3.2.5 Aderenza barra-calcestruzzo

(1)P L'aderenza tra una barra di composito ed il calcestruzzo circostante è assicurata dalla mobilitazione di un sistema di tensioni interattive, il cui valore dipende dalla geometria della barra, dalle sue proprietà superficiali di natura chimico-fisica e dalla classe di resistenza del calcestruzzo. Quest'ultimo parametro è, nel caso delle barre di FRP, meno influente che nel caso delle barre d'acciaio.

(2) La completa caratterizzazione del legame di aderenza richiederebbe l'esecuzione di specifiche prove di *pull-out* su campioni di barre.

Nel contesto delle presenti Istruzioni, è possibile ovviare a tale caratterizzazione a patto di soddisfare le limitazioni di seguito previste per gli stati limite di esercizio, alcune delle quali permettono di tener conto implicitamente, in modo forfetario, dei fenomeni connessi.

## 3.3 CARATTERISTICHE DELLE GRIGLIE DI FRP

(1) I valori delle proprietà geometriche e meccaniche delle griglie possono essere ricavati con le stesse modalità indicate per le barre singole.

(2) In particolare, in assenza di adeguate sperimentazioni ed a vantaggio di sicurezza, le proprietà di aderenza di una griglia di FRP possono essere assimilate a quelle delle singole barre costituenti.

### 3.4 SCHEDE TECNICHE PER LE BARRE DI FRP

(1) I produttori sono tenuti a predisporre apposite schede tecniche relative alle barre di FRP. In Appendice C è suggerito il formato di una scheda tipo.

### 3.5 QUALIFICAZIONE

(1)P Le barre di FRP da utilizzarsi come armatura di strutture di conglomerato cementizio devono essere assoggettate ad una serie di controlli che assicurino un livello adeguato delle caratteristiche meccaniche e fisiche.

Il processo di qualificazione, attraverso specifiche prove sperimentali, deve essere sviluppato dal produttore con tre specifici obiettivi:

- assicurare la qualità del prodotto ed il rispetto di valori minimi richiesti dalla Normativa vigente;
- fornire un numero statisticamente significativo di risultati sperimentali relativi alle caratteristiche fisiche e meccaniche del prodotto, con l'obiettivo di costituire un utile strumento per la progettazione;
- fornire eventualmente dati relativi a prove sperimentali da cui possano desumersi informazioni sul comportamento nel tempo delle barre di FRP, anche a seguito di escursioni termiche come previsto dalla Normativa vigente.

(2) Le prove di qualificazione riguardano le caratteristiche geometriche, meccaniche (rigidezza e resistenza) e fisiche possedute dalle barre, indipendentemente dalla particolare applicazione a cui sono destinate.

È possibile distinguere due livelli di qualificazione:

- Livello 1: in cui si definiscono le caratteristiche fisiche e meccaniche delle barre attraverso un'analisi statistica di una serie sufficientemente ampia di prove.
- Livello 2: in cui si definiscono anche le caratteristiche fisiche e meccaniche delle barre a lungo termine.

(3)P Le prove meccaniche e fisiche di qualificazione devono essere condotte da un laboratorio qualificato che disponga di tutte le attrezzature necessarie e che abbia una comprovata esperienza nella caratterizzazione dei materiali compositi.

È opportuno che ciascun produttore fornisca le caratteristiche meccaniche ricavate su base statistica e comprendenti i valori caratteristici, di cui devono essere definiti i corrispondenti frattili, i valori medi, gli scarti quadratici, l'intervallo di confidenza ed il numero di campioni esaminati. A tali valori devono essere applicati gli opportuni coefficienti parziali.

(4) Le prove di caratterizzazione più comuni relative ai Livelli 1 e 2 sono riportate in Appendice C.

(5)P La produzione delle barre di FRP deve essere costantemente oggetto di programmi di controllo della qualità. Questi ultimi devono riguardare oltre la tecnica di produzione della barra (es. pultrusione) anche gli elementi di base che costituiscono le barre (fibre e resine).

I produttori devono fornire i certificati di prova dei prodotti per assicurare la rispondenza di ogni lotto di fabbricazione con le specifiche dichiarate.

Quando possibile, sui prodotti deve essere riportata una marchiatura che ne permetta la completa rintracciabilità. In caso contrario, i prodotti devono essere accompagnati da etichette o cartellini riportanti tutte le informazioni necessarie per la loro rintracciabilità.

### **3.6 ACCETTAZIONE**

(1) Al processo di accettazione delle barre di FRP devono partecipare tutti gli operatori coinvolti e precisamente:

- Progettista;
- Impresa appaltatrice;
- Direttore dei lavori;
- Laboratori di prova;
- Collaudatore.

In Appendice D sono riportati i compiti e le responsabilità dei diversi operatori.

## **4 CONCETTI BASILARI DEL PROGETTO**

(1)P Il progetto delle strutture di calcestruzzo armato con barre lente di FRP deve soddisfare requisiti di resistenza e di esercizio.

(2)P Non si deve fare affidamento sui contributi di resistenza e di rigidezza forniti da barre compresse di FRP o dai tratti di esse soggette a tensioni di compressione.

### **4.1 REQUISITI FONDAMENTALI**

(1)P I requisiti fondamentali del progetto di strutture di calcestruzzo con armatura di FRP possono ritenersi soddisfatti se si garantisce:

- la scelta di materiali opportuni;
- un'accorta cura dei particolari costruttivi;
- la definizione di opportune procedure di controllo per la progettazione, la produzione, l'esecuzione e l'uso.

### **4.2 VITA UTILE DELLA STRUTTURA**

(1)P Ai fini delle verifiche di sicurezza degli elementi strutturali di calcestruzzo armato con barre di FRP si deve fare riferimento alla vita utile convenzionale ed ai corrispondenti livelli delle azioni di calcolo previsti nella Normativa vigente.

(2)P Qualora le barre di FRP vengano utilizzate per la realizzazione di costruzioni di calcestruzzo armato a carattere provvisoria, le azioni di calcolo e la valutazione della sicurezza devono essere commisurate alla reale vita utile della struttura (inferiore ad un anno) in accordo con la Normativa specifica.

### **4.3 REQUISITI DI DURABILITÀ**

(1)P La struttura deve essere progettata tenendo conto sia delle condizioni ambientali che del programma di manutenzione.

(2) Per assicurare durabilità alla struttura di calcestruzzo armato con barre di FRP vanno tenuti in debito conto:

- la destinazione d'uso prevista;
- le condizioni ambientali attese;
- la composizione, le proprietà e le prestazioni dei materiali impiegati.

(3)P Problemi speciali di progetto (azioni ambientali, modalità di carico, ecc.) devono essere identificati fin dal primo momento così che possa essere valutata la loro importanza in relazione agli aspetti di durabilità dell'armatura di FRP.

### **4.4 PRINCIPI GENERALI DEL PROGETTO DI RINFORZO**

#### **4.4.1 Generalità**

(1)P Le verifiche degli elementi strutturali devono essere condotte sia nei riguardi degli stati limite di esercizio che nei riguardi degli stati limite ultimi, come definiti nella Normativa vigente.

(2) La verifica nei riguardi di uno stato limite può essere omessa a favore di quella nei confronti di un altro stato limite, sempre che la prima sia una conseguenza della seconda.

(3)P Si deve verificare, mediante il metodo dei coefficienti parziali, che, in tutte le situazioni di progetto, adottando i valori di calcolo delle azioni, delle sollecitazioni e delle resistenze, non sia violato alcuno stato limite. Deve cioè risultare:

$$E_d \leq R_d, \quad (4.1)$$

dove  $E_d$  ed  $R_d$  sono, rispettivamente, i valori di progetto (o di calcolo) della generica domanda (effetto, sollecitazione, ecc.) presa in considerazione e della corrispondente capacità (in termini di resistenza o di deformazione) nell'ambito dello stato limite esaminato.

(4) I valori di calcolo si ricavano da quelli caratteristici per il tramite di opportuni coefficienti parziali, i cui valori, per i vari stati limite, sono codificati nella Normativa vigente, ovvero sono indicati nel presente documento con riferimento allo specifico ambito qui trattato.

#### 4.4.2 Azioni di calcolo

(1) Le azioni di calcolo da adottare nel progetto sono quelle prescritte dalla Normativa vigente.

#### 4.4.3 Proprietà dei materiali

(1)P I valori delle proprietà delle barre di FRP devono essere determinati mediante prove normalizzate di laboratorio, del tipo di quelle indicate nel capitolo sui materiali.

(2) Le proprietà meccaniche di resistenza e di deformazione delle barre di FRP sono quantificate dai corrispondenti valori caratteristici. I soli parametri di rigidezza (moduli elastici) sono valutati attraverso i corrispondenti valori medi.

(3) Il valore di calcolo,  $X_d$ , della generica proprietà di resistenza o di deformazione di un materiale può essere espresso in forma generale mediante una relazione del tipo:

$$X_d = \eta \frac{X_k}{\gamma_m}, \quad (4.2)$$

dove  $X_k$  è il valore caratteristico della proprietà in questione,  $\eta$  è un fattore di conversione che tiene conto, in maniera moltiplicativa, di problemi speciali di progetto,  $\gamma_m$  è infine il coefficiente parziale del materiale.

(4) Il fattore di conversione  $\eta$  si ottiene come prodotto del fattore di conversione ambientale,  $\eta_a$ , per il fattore di conversione relativo ad effetti di lunga durata,  $\eta_l$ . I valori da attribuire a tali fattori sono riportati nella Tabella 4-1 e nella Tabella 4-2, rispettivamente. In deroga ai suddetti valori è possibile assegnare ai fattori  $\eta_a$  ed  $\eta_l$  i valori estrapolati da risultati sperimentali. Questi ultimi sono ottenuti sottoponendo le barre ad una tensione costante, pari alla tensione massima di esercizio, in condizioni ambientali analoghe a quelle di servizio, verificando nel tempo la capacità resistente residua delle stesse barre secondo le indicazioni della Norma ISO TC 71/SC 6 N.

#### 4.4.4 Capacità resistente di calcolo

(1) La capacità resistente di calcolo,  $R_d$ , è esprimibile come:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R\{X_{d,i}; a_{d,i}\}. \quad (4.3)$$

Nella (4.3)  $R\{\cdot\}$  è un'opportuna funzione riconducibile allo specifico modello meccanico considerato (ad esempio quello per la flessione, per il taglio, ecc.) e  $\gamma_{Rd}$  è un coefficiente parziale che tiene conto delle incertezze insite nel suddetto modello; se non espressamente indicato tale coefficiente è posto pari ad 1. Come argomenti della funzione  $R\{\cdot\}$  figureranno, in generale, un certo numero di parametri meccanici e geometrici, di cui  $X_{d,i}$  e  $a_{d,i}$  sono, rispettivamente, i valori di calcolo ed i valori nominali.

### 4.5 COEFFICIENTI PARZIALI

#### 4.5.1 Coefficienti parziali $\gamma_m$ per i materiali

- (1) Per gli stati limite ultimi, il valore da attribuire al coefficiente parziale  $\gamma_m$  per le barre di FRP, qui denotato con  $\gamma_f$ , è pari a 1.5.
- (2) Per gli stati limite di esercizio, il valore da attribuire allo stesso coefficiente parziale è:  $\gamma_f = 1$ .
- (3) Per il conglomerato cementizio devono essere adottati i coefficienti parziali previsti dalla Normativa vigente.

### 4.6 PROBLEMI SPECIALI DI PROGETTO E RELATIVI FATTORI DI CONVERSIONE

(1) Sono di seguito riportati i valori di riferimento da attribuire al fattore di conversione  $\eta$ , in relazione ad aspetti che possono influenzare la durabilità ed il comportamento degli FRP in particolari condizioni.

#### 4.6.1 Azioni ambientali e fattore di conversione ambientale $\eta_a$

- (1)P Le proprietà meccaniche (per esempio la resistenza a trazione, la deformazione ultima ed il modulo di elasticità normale) delle barre di FRP degradano in presenza di determinate condizioni ambientali quali: ambiente alcalino ed umidità (acqua e soluzioni saline).
- (2) Effetti da ambiente alcalino. L'acqua contenuta nei pori del calcestruzzo può provocare un degrado della matrice polimerica. Il danneggiamento della matrice polimerica dovuto all'attacco di alcali è in genere più grave di quello dovuto all'umidità.
- (3) Effetti dell'umidità (acqua e soluzioni saline). I principali effetti dell'assorbimento di umidità riguardano la matrice e sono: plasticizzazione, riduzione della temperatura di transizione vetrosa, riduzione di resistenza e riduzione (meno pronunciata) di rigidità. L'assorbimento di umidità dipende dal tipo di matrice polimerica, dall'interfaccia matrice-fibra e dalla composizione e qualità delle barre.

(4) La Tabella 4-1 indica, per differenti tipi di materiale e condizioni di esposizione della struttura armata con barre di FRP, i valori da attribuire al fattore di conversione ambientale  $\eta_a$ .

**Tabella 4-1** – Fattore di conversione ambientale  $\eta_a$  per varie condizioni di esposizione della struttura e vari tipi di fibra.

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / matrice*	$\eta_a$
Calcestruzzo non esposto ad ambiente umido	Carbonio / Vinilestere o epossidica	1.0
	Vetro / Vinilestere o epossidica	0.8
	Arammidica / Vinilestere o epossidica	0.9
Calcestruzzo esposto ad ambiente umido	Carbonio / Vinilestere o epossidica	0.9
	Vetro / Vinilestere o epossidica	0.7
	Arammidica / Vinilestere o epossidica	0.8

\* È consentito l'uso di resine poliestere unicamente per strutture a carattere provvisoriale.

(5) Qualora le barre di FRP siano impiegate per la realizzazione di costruzioni di calcestruzzo armato a carattere provvisoriale (con vita utile non superiore ad un anno), per il fattore di conversione ambientale può essere assunto il valore  $\eta_a=1$ .

#### 4.6.2 Modalità di carico e fattore di conversione per effetti di lunga durata $\eta_l$

(1)P Le proprietà meccaniche (per esempio la resistenza a trazione, la deformazione ultima ed il modulo di elasticità normale) delle barre di FRP degradano per l'effetto di fenomeni reologici, quali la viscosità, il rilassamento e la fatica.

(2) Effetti di fatica statica, viscosità e rilassamento. Nelle barre di FRP la fatica statica, la viscosità ed il rilassamento dipendono dalle proprietà della matrice e delle fibre di rinforzo. In genere le matrici termoidurenti (esteri vinili, resine epossidiche e fenoliche) sono meno viscosi di quelle termoplastiche (polipropilene, nylon, policarbonati, ecc.). Poiché la presenza di fibre diminuisce la viscosità della matrice, tali fenomeni sono più pronunciati quando il carico è applicato trasversalmente alle fibre o quando il composito è caratterizzato da una bassa percentuale in volume di fibre. Il rischio di innesco del fenomeno della fatica statica può essere mitigato assicurando, in esercizio, un livello tensionale adeguatamente basso. Le armature di FRP a base di carbonio sono le meno suscettibili a rottura da fatica statica; quelle a base di fibre aramidiche sono moderatamente suscettibili; quelle a base di fibre di vetro sono le più suscettibili.

Generalmente le fibre di carbonio e di vetro esibiscono un limitato rilassamento (dell'ordine del 3%), mentre quello esibito dalle fibre aramidiche è più marcato.

(3) Effetti di fatica. Le prestazioni delle barre di FRP in condizioni di fatica sono generalmente molto buone. Le fibre di vetro sono le più suscettibili a tale fenomeno.

(4) Per evitare la rottura delle armature di FRP sotto tensioni prolungate nel tempo, oppure in condizioni di carico ciclico, i valori da attribuire rispettivamente al fattore di conversione  $\eta_l$  nelle verifiche agli stati limite di esercizio e ultimi sono riportati in Tabella 4-2.

**Tabella 4-2** – Fattore di conversione per effetti di lunga durata  $\eta_l$  per vari sistemi di FRP.

Modalità di carico	Tipo di fibra / resina	$\eta_l$	$\eta_l$
		(SLE)	(SLU)
Quasi permanente e/o ciclico (viscosità, rilassamento e fatica)	Vetro / Vinilestere o epossidica	0.30	1.00
	Arammidica / Vinilestere o epossidica	0.50	1.00
	Carbonio / Vinilestere o epossidica	0.90	1.00

## 4.7 FLESSIONE

### 4.7.1 Generalità

(1) Nel prosieguo sarà esaminata la sollecitazione di flessione retta, relativa ad esempio a situazioni in cui l'asse di sollecitazione coincide con un asse di simmetria della sezione trasversale dell'elemento armato.

### 4.7.2 Analisi del comportamento agli stati limite ultimi

#### 4.7.2.1 Fondamenti del calcolo

(1)P Il progetto allo stato limite ultimo richiede il dimensionamento dell'elemento strutturale in modo che il momento sollecitante di progetto,  $M_{Sd}$ , e quello resistente di progetto,  $M_{Rd}$ , soddisfino la disequazione:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} . \quad (4.4)$$

(2)P Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo stato limite ultimo delle sezioni di calcestruzzo armato con barre di FRP sono le seguenti:

- conservazione della planeità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra calcestruzzo e barre di FRP;
- incapacità del calcestruzzo di resistere a sforzi di trazione;
- incapacità delle barre di FRP di resistere a sforzi di compressione;
- legame costitutivo del calcestruzzo conforme alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

(3)P Si ipotizza che la rottura per flessione si manifesti quando si verifica una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso,  $\varepsilon_{cu}$ , come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione ultima nelle barre di FRP,  $\varepsilon_{fd}$ , calcolata a partire da quella caratteristica a trazione,  $\varepsilon_{fk}$ , tenendo conto attraverso un opportuno coefficiente riduttivo (0.9) della circostanza che la deformazione ultima delle barre di FRP annegate in elementi inflessi è inferiore a quella valutata mediante prove di trazione diretta:

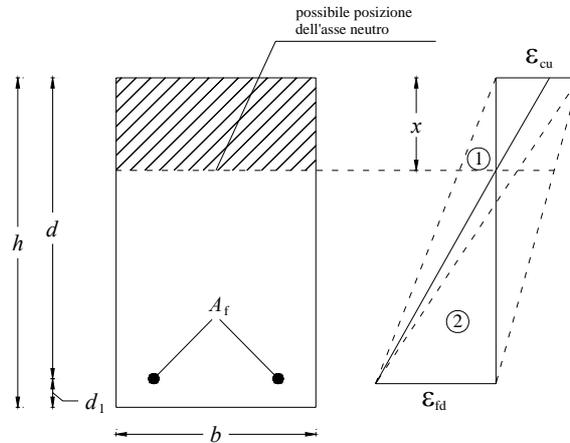
$$\varepsilon_{fd} = 0.9 \cdot \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} , \quad (4.5)$$

dove  $\eta_a$  e  $\gamma_f$  sono i coefficienti definiti rispettivamente nella Tabella 4-1 e nel § 4.5.1.

#### 4.7.2.2 Valutazione del momento resistente

(1)P La valutazione della resistenza flessionale della sezione si effettua in conformità con le ipotesi riportate nel § 4.7.2.1.

(2) Con riferimento alla situazione esemplificativa rappresentata in Figura 4-1, si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima dilatazione dell'armatura di FRP tesa (zona 1) o la massima contrazione del calcestruzzo compresso (zona 2).



**Figura 4-1** – Modalità di rottura di una sezione di calcestruzzo armato con barre di FRP.

(3) Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione elastica limite di progetto nell'armatura di FRP: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione dell'armatura,  $\varepsilon_{fd}$ , definito dalla relazione (4.5). Tale valore, nel caso di disposizione delle armature in più registri, si intende riferito al baricentro della barra più distante dall'asse neutro.

Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma per il tramite delle seguenti relazioni:

- (calcestruzzo al lembo compresso) 
$$\varepsilon_c = \varepsilon_{fd} \cdot \frac{x}{(d - x)} \leq \varepsilon_{cu} ,$$
- (fibra baricentrica delle barre di FRP) 
$$\varepsilon_f = \varepsilon_{fd} ,$$

nelle quali si è utilizzata la simbologia di Figura 4-1 e dove  $\varepsilon_{cu}$  è la deformazione limite a compressione già introdotta in precedenza.

(4) Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo, mentre nell'armatura la deformazione limite non è stata ancora raggiunta: in tal caso resta fissata la deformazione massima del calcestruzzo compresso,  $\varepsilon_{cu}$ , in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Ancora una volta le deformazioni normali competenti alle diverse fibre della sezione retta dell'elemento, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità del diagramma per il tramite delle seguenti relazioni:

- (calcestruzzo al lembo compresso) 
$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} ,$$
- (fibra baricentrica delle barre di FRP) 
$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x} \leq \varepsilon_{fd} ,$$

nelle quali si è utilizzata la simbologia di Figura 4-1.

(5) Per entrambe le tipologie di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), la distanza dell'asse neutro,  $x$ , dall'estremo lembo compresso è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$N_c - N_f = 0, \quad (4.6)$$

essendo  $N_c$  ed  $N_f$  le intensità dei risultanti degli sforzi, rispettivamente, di compressione e di trazione.

Successivamente, il valore del momento resistente,  $M_{Rd}$ , può essere ricavato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione.

(6) Poiché le barre di FRP hanno un comportamento elastico-lineare fino a rottura, le loro tensioni di lavoro possono essere calcolate come prodotto delle competenti deformazioni per i rispettivi moduli di elasticità in direzione longitudinale.

(7) Conformemente a quanto previsto dalla Normativa vigente, ai fini della verifica locale delle sezioni allo stato limite ultimo (SLU) è possibile avvalersi per il calcestruzzo di una distribuzione semplificata delle tensioni normali del tipo “*stress-block*”; ciò sia nel caso che la rottura della sezione si manifesti per raggiungimento della massima contrazione nel calcestruzzo compresso sia nel caso che essa si manifesti per raggiungimento della massima dilatazione nelle barre tese di FRP.

#### 4.7.2.3 Armatura minima

(1) L'area delle armature tese longitudinali di FRP non deve essere inferiore a quella minima, valutata imponendo il soddisfacimento della seguente condizione:

$$M_{Rd} = 1.5 \cdot M_{cr}, \quad (4.7)$$

dove  $M_{cr}$  rappresenta il momento di prima fessurazione, da determinarsi in accordo con la Normativa vigente.

(2) Per elementi non armati a taglio deve essere prevista un'armatura tesa longitudinale in grado di assicurare un valore del parametro  $\rho_1 = A_f / (b \cdot d)$  almeno pari a 0.01.

### 4.7.3 Analisi del comportamento agli stati limite di esercizio

#### 4.7.3.1 Fondamenti del calcolo

(1)P Sono qui esaminati gli stati limite di esercizio più comuni, ed in particolare quelli relativi:

- alla limitazione delle tensioni (§ 4.7.3.2);
- al controllo dell'inflessione (§ 4.7.3.3);
- al controllo della fessurazione (§ 4.7.3.4).

Altri stati limite di esercizio possono risultare importanti in particolari situazioni, pur non essendo elencati esplicitamente nelle presenti Istruzioni.

(2)P Sotto i carichi di esercizio è necessario verificare che:

- i livelli tensionali nei materiali siano opportunamente limitati allo scopo di evitare la rottura delle barre di FRP sotto tensioni prolungate nel tempo e di mitigare i fenomeni di viscosità nel calcestruzzo;
- le deformazioni e le frecce non attingano valori eccessivi, tali cioè da inficiare il normale uso della struttura, produrre danni ad elementi non portanti, arrecare disturbo psicologico agli utenti;
- i fenomeni fessurativi risultino opportunamente contenuti, dal momento che la presenza di fessure troppo numerose o troppo aperte potrebbe ridurre notevolmente la durabilità delle strutture, la loro funzionalità, il loro aspetto e danneggiare l'integrità del legame di aderenza all'interfaccia barra di FRP-calcestruzzo.

(3)P Le verifiche in condizioni di esercizio possono essere svolte in campo elastico-lineare tenendo conto sia del comportamento per sezione interamente reagente che per sezione fessurata. Le tensioni nei materiali sono valutabili per sovrapposizione degli effetti.

Le ipotesi alla base del calcolo sono:

- comportamento elastico lineare dei materiali;
- conservazione della pianeità delle sezioni rette;
- perfetta aderenza tra calcestruzzo e barre di FRP.

(4)P La prima ipotesi comporta l'assunzione di un modulo di elasticità normale costante per ciascun materiale; la seconda implica la linearità del diagramma delle deformazioni sulla sezione retta dell'elemento inflesso; la terza, insieme con la prima, permette di definire un rapporto di proporzionalità tra la tensione nella barra di FRP e quella nella fibra di calcestruzzo ad essa adesa ( $\sigma_f/\sigma_c = E_f/E_c = n_f$ ).

Tale rapporto è definito come coefficiente di omogeneizzazione del composito fibrorinforzato rispetto al calcestruzzo compresso. Esso permette di rappresentare il diagramma delle tensioni su una sezione di calcestruzzo armato con barre di FRP come quello di una sezione omogenea, purché si intenda il valore della tensione relativo alla barra di FRP amplificato  $n_f$  volte.

Il valore del coefficiente di omogeneizzazione deve essere stabilito tenendo conto della viscosità del calcestruzzo e quindi facendo riferimento a situazioni sia a breve che a lungo termine.

(5)P Per effettuare le verifiche in condizioni di esercizio è necessario valutare la posizione dell'asse neutro ed il momento di inerzia della sezione di c.a. fessurata e non fessurata.

(6)P Nel calcolo delle tensioni, se del caso, è necessario considerare, oltre agli effetti dei carichi, anche quelli delle variazioni termiche, della viscosità, del ritiro e di eventuali altre distorsioni.

#### 4.7.3.2 Verifica delle tensioni

(1)P In condizioni di esercizio le tensioni nelle barre di FRP, per effetto della combinazione di carico quasi permanente, devono soddisfare la limitazione  $\sigma_f \leq f_{fd}$ , essendo  $f_{fd}$  la tensione di progetto delle fibre allo stato limite di esercizio (SLE), calcolata con  $\gamma_f = 1$  ed  $\eta$  il fattore di conversione, i cui valori sono suggeriti nel § 4.6.

Le tensioni nel calcestruzzo vanno limitate in accordo con quanto prescritto nella Normativa vigente.

#### 4.7.3.3 Verifica delle frecce

(1)P Le deformazioni esibite dalle strutture armate con FRP devono rispettare le limitazioni imposte dalla Normativa vigente per strutture di c.a. con barre metalliche.

(2)P Il modello adottato deve simulare il comportamento reale della struttura con un livello di accuratezza adeguato agli obiettivi del calcolo. In particolare si deve tenere conto dell'eventuale presenza della fessurazione per gli effetti da essa prodotti sulla deformazione del corrente teso.

(3)P Se risulta appropriato, il modello meccanico adottato deve tenere conto:

- del valore del modulo di elasticità normale del calcestruzzo in funzione della maturazione al momento della messa in carico;
- degli effetti della viscosità e del ritiro;
- dell'effetto irrigidente del calcestruzzo teso tra le fessure;
- dell'influenza di distorsioni eventualmente agenti, quali ad esempio quelle di origine termica;
- della modalità di applicazione del carico, sia essa statica o dinamica.

(4)P È opportuno rilevare che, in caso di calcolo non lineare delle frecce, non vale il principio di sovrapposizione degli effetti.

(5) Il calcolo delle frecce per elementi inflessi di calcestruzzo armato con barre di FRP può essere effettuato mediante integrazione del diagramma delle curvature. Queste ultime possono essere valutate attraverso un'analisi non lineare che tenga conto della fessurazione e dell'effetto irrigidente del calcestruzzo teso.

In alternativa sono possibili analisi semplificate del tipo di quelle in uso per le ordinarie sezioni di c.a.. Esperienze di laboratorio hanno dimostrato che il modello proposto dall'Eurocodice 2 (EC2) per elementi armati con barre di acciaio può ritenersi valido anche per quelli armati con barre di FRP. Pertanto, per il calcolo della freccia,  $f$ , si può utilizzare la seguente formula predittiva tratta dall'EC2:

$$f = f_1 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^m + f_2 \cdot \left[ 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^m \right] \quad (4.8)$$

dove:

- $f_1$  è la freccia calcolata nell'ipotesi di sezione interamente reagente;
- $f_2$  è la freccia calcolata nell'ipotesi di sezione parzializzata;
- $\beta_1$  è un coefficiente adimensionale che tiene conto della qualità dell'aderenza delle barre, da assumersi pari a 0.5;
- $\beta_2$  è un coefficiente dimensionale che tiene conto della durata dei carichi (1.0 per carichi di breve durata, 0.5 per carichi di lunga durata o ciclici);
- $M_{max}$  è il momento massimo che agisce sull'elemento esaminato;
- $M_{cr}$  è il momento di prima fessurazione che compete alla stessa sezione soggetta al momento  $M_{max}$  ;

-  $m$  è un coefficiente da assumersi pari a 2.

(6) Laddove il produttore voglia caratterizzare sperimentalmente l'aderenza delle barre ai fini di una valutazione più accurata della freccia, si procede in accordo con il contenuto dell'Appendice E.

#### 4.7.3.4 Verifica dell'apertura delle fessure

(1)P Per proteggere le barre di FRP e garantire la funzionalità degli elementi, occorre prevedere opportune limitazioni sui valori dell'apertura delle fessure in condizioni di esercizio.

(2) Ai fini della verifica dell'apertura delle fessure si suggerisce di fare riferimento alla sola combinazione di carico frequente.

(3)P L'apertura delle fessure per le strutture armate con barre di FRP non deve essere in nessun caso superiore a 0.5 mm.

(4)P Ad eccezione dei casi di impiego di barre lisce, le sperimentazioni effettuate su elementi armati con barre di FRP hanno dimostrato la validità delle formule predittive riportate nell'EC2 per il calcolo dell'apertura delle fessure, sia in termini di distanza tra le fessure sia in termini di effetto irrigidente del calcestruzzo teso.

È possibile pertanto utilizzare la seguente formula predittiva:

$$w_k = \beta \cdot s_{fm} \cdot \varepsilon_{fm}, \quad (4.9)$$

dove:

-  $w_k$  è l'ampiezza caratteristica delle fessure, espressa in mm;

-  $\beta$  è un coefficiente che correla l'ampiezza media delle fessure al valore caratteristico, da assumersi pari a:

- i) 1.7 per fessurazione indotta da carichi;
- ii) 1.7 per fessurazione indotta da deformazioni impedito in sezioni con dimensione minima (indifferentemente altezza, larghezza o spessore) maggiore di 800 mm;
- iii) 1.3 per fessurazione indotta da deformazioni impedito in sezioni con dimensione minima non superiore a 300 mm;
- iv) un valore interpolato linearmente tra 1.3 e 1.7 in sezioni con dimensione minima compresa tra 300 mm e 800 mm, sempre nel caso di fessurazione indotta da deformazioni impedito.

-  $s_{fm}$  è la distanza media finale tra le fessure, espressa in mm;

-  $\varepsilon_{fm}$  è la deformazione media che tiene conto, nella combinazione di carico considerata, dell'effetto irrigidente, dell'effetto del ritiro, ecc.

(5) La distanza media finale tra le fessure può essere calcolata mediante la seguente relazione:

$$s_{fm} = 50 + 0.25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{d_b}{\rho_r}, \quad (4.10)$$

dove:

- $k_1$  è un coefficiente che tiene conto delle proprietà di aderenza delle barre, da assumersi di norma pari a 1.6;
- $k_2$  è un coefficiente che tiene conto del diagramma delle deformazioni (0.5 per flessione, 1.0 per trazione centrata);
- $d_b$  è il diametro nominale delle barre, espresso in mm; se nella stessa sezione sono impiegati più diametri, può essere adottato il loro valore medio;
- $\rho_r$  è il rapporto di armatura efficace,  $A_f / A_{c,eff}$ , dove  $A_{c,eff}$  è l'area tesa efficace definita come l'area della zona di calcestruzzo che circonda le armature tese, la cui altezza è pari a 2.5 volte la distanza tra il lembo teso della sezione ed il baricentro delle armature (EC2).

(6) Il valore di  $\varepsilon_{im}$  può essere ricavato mediante la seguente relazione:

$$\varepsilon_{im} = \frac{\sigma_f}{E_f} \cdot \left[ 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left( \frac{\sigma_{fr}}{\sigma_f} \right)^m \right], \quad (4.11)$$

dove:

- $\sigma_f$  è la tensione nell'armatura tesa relativa alla sezione fessurata;
- $\beta_1$  e  $\beta_2$  sono i coefficienti già definiti nel § 4.7.3.3;
- $\sigma_{fr}$  è la tensione nell'armatura tesa relativa alla sezione fessurata al comparire della prima fessura;
- $m$  è un coefficiente da assumersi pari a 2.

(7) Laddove il produttore voglia caratterizzare sperimentalmente l'aderenza delle barre ai fini di una valutazione più accurata dell'apertura delle fessure, si rimanda a quanto riportato in Appendice E per la determinazione dei coefficienti  $m$  e  $k_1$ .

## 4.8 TAGLIO

### 4.8.1 Generalità

(1) Il presente documento si riferisce al solo caso di armatura a taglio realizzata con staffe disposte perpendicolarmente all'asse dell'elemento.

(2)P Le verifiche a taglio di elementi di calcestruzzo armato con barre di FRP si eseguono esclusivamente nei confronti degli stati limite ultimi.

## 4.8.2 Fondamenti del calcolo

### 4.8.2.1 Elementi senza armature trasversali resistenti a taglio

(1) È consentita la realizzazione di solette, piastre o membrature a comportamento analogo, sprovviste di staffe, a condizione che esse presentino un'opportuna capacità di ripartizione trasversale dei carichi.

(2) Allo SLU la resistenza di calcolo a taglio di un elemento armato con barre di FRP sprovvisto di staffe può essere valutata mediante la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min \{ V_{Rd,ct}, V_{Rd,max} \}, \quad (4.12)$$

dove  $V_{Rd,ct}$  è il contributo del calcestruzzo, da determinarsi come appresso indicato;  $V_{Rd,max}$  è la resistenza della biella compressa di calcestruzzo in accordo con la Normativa vigente.

(3) Il contributo del calcestruzzo,  $V_{Rd,ct}$ , può essere calcolato nel modo seguente:

$$V_{Rd,ct} = 1.3 \cdot \left( \frac{E_f}{E_s} \right)^{1/2} \cdot \tau_{Rd} \cdot k \cdot (1.2 + 40\rho_1) \cdot b \cdot d, \quad (4.13)$$

dove:

-  $E_f$  ed  $E_s$  sono, rispettivamente, il modulo di elasticità normale delle barre di FRP e dell'acciaio, espressi in  $N/mm^2$ ;

-  $\tau_{Rd}$  è la resistenza unitaria a taglio di calcolo di riferimento, espressa in  $N/mm^2$  e definita come:  
 $\tau_{Rd} = 0.25 f_{ctd}$ ;

-  $k$  è un coefficiente che assume un valore unitario per elementi in cui più del 50% dell'armatura tesa risulti interrotta; in caso contrario, esso deve essere valutato a partire dalla relazione:  
 $k = (1.6 - d) \geq 1$ , nella quale la grandezza  $d$  è espressa in metri;

- il parametro  $\rho_1$ , come già detto, vale  $\rho_1 = A_f / (b \cdot d)$  e non può assumere un valore superiore a 0.02.

### 4.8.2.2 Elementi con armature trasversali resistenti a taglio

(1) Allo SLU, la resistenza di calcolo a taglio dell'elemento armato con barre di FRP in presenza di staffe è valutabile mediante la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min \{ V_{Rd,ct} + V_{Rd,f}, V_{Rd,max} \},$$

dove  $V_{Rd,ct}$  e  $V_{Rd,max}$  sono le quantità introdotte al § 4.8.2.1, mentre  $V_{Rd,f}$  è il contributo delle staffe di FRP da determinarsi come di seguito indicato.

(2) Il contributo delle staffe di FRP,  $V_{Rd,f}$ , è determinabile per il tramite della relazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{A_{fw} \cdot f_{fr} \cdot d}{s}, \quad (4.14)$$

nella quale  $A_{fw}$  è l'area delle staffe di FRP poste ad interasse  $s$  (da intendersi come somma delle aree dei bracci di una singola staffa),  $s$  è il loro passo ed  $f_{fr}$  la cosiddetta resistenza di progetto ridotta, definita come  $0.5 \cdot f_{fd}$ .

#### 4.8.3 Armatura minima

(1) Laddove sia richiesta l'armatura a taglio, è necessario verificare che la sua area complessiva non sia inferiore a:

$$A_{fw,min} = \frac{0.4 \cdot \sqrt{f_{cd}} \cdot b \cdot s}{0.004 \cdot E_f} \quad [\text{tensioni in N/mm}^2], \quad (4.15)$$

dove i simboli hanno il significato noto.

#### 4.9 ARMATURA SECONDARIA CON FRP

(1) Nelle solette non calcolate a piastra, come anche in altri elementi bidimensionali calcolati con modelli monodimensionali, si valuta solo l'armatura da disporre secondo la direzione prevalente. Oltre a tale armatura deve essere prevista un'armatura secondaria di ripartizione, da disporsi ortogonalmente a quella calcolata. L'area specifica dell'armatura secondaria (per unità di lunghezza) non deve essere inferiore al 20% di quella principale anch'essa riferita all'unità di lunghezza.

#### 4.10 LUNGHEZZA DI ANCORAGGIO

(1) La lunghezza di ancoraggio delle barre di FRP in zona tesa non può risultare inferiore a:

$$l_d = 0.1 \cdot f_{fd} \cdot d_b \quad [\text{forze in N, lunghezze in mm}], \quad (4.16)$$

dove  $d_b$  è il diametro nominale della barra.

In ogni caso la lunghezza di ancoraggio non deve risultare inferiore al più grande dei valori: 400 mm e  $40 \cdot d_b$ .

(2) Non è consentito l'ancoraggio o la sovrapposizione in zona tesa di barre di FRP aventi superficie liscia. Per queste ultime la lunghezza di ancoraggio o di sovrapposizione in zona compressa può essere valutata come due volte quella fornita dall'equazione (4.16).

#### 4.11 PARTICOLARI COSTRUTTIVI

(1) Ferma restante la limitazione di cui al § 4(2)P, nei pilastri deve essere garantita un'armatura minima pari allo 0.3 % dell'area di calcestruzzo nel caso di barre con fibre di carbonio, all'1.5 % della stessa area nel caso di barre con fibre di vetro ed allo 0.8 % dell'area di essa nel caso di barre con fibre di arammide.

(2) Al fine di limitare le concentrazioni tensionali in corrispondenza delle piegature delle barre, queste ultime devono essere realizzate prevedendo un raccordo circolare il cui raggio non risulti inferiore a sei volte il diametro della barra.

(3) Per cautelarsi nei confronti dei fenomeni di cui al § 3.2.3(4), si consiglia di adottare un ricoprimento delle barre di FRP non inferiore ad un valore di soglia,  $d_s$ . Esso si assume pari al copriferro indicato nelle Norme vigenti per le strutture tradizionali di conglomerato cementizio armato con barre d'acciaio, avendo cura di soddisfare le ulteriori limitazioni:

$$d_s \geq \begin{cases} 25 \text{ mm (nel caso di piastre)} \\ 30 \text{ mm (nel caso di travi)} \\ 35 \text{ mm (nel caso di pilastri)} \end{cases} \quad (4.17)$$

Per i calcestruzzi con resistenza cubica inferiore a  $25 \text{ N/mm}^2$  il valore di soglia  $d_s$  va maggiorato del 20%.

(4) Nelle travi si devono prevedere almeno tre staffe al metro e comunque il passo di queste ultime non deve essere maggiore di 0.8 volte l'altezza utile della sezione.

Nelle zone di attacco con i pilastri, per un tratto pari all'altezza utile della sezione trasversale, il passo delle staffe non deve eccedere la più piccola delle seguenti dimensioni:

- un quarto dell'altezza utile della sezione trasversale;
- 15 cm.

(5) Nei pilastri deve essere sempre prevista una staffatura disposta con un interasse non maggiore di 15 volte il diametro minimo delle barre impiegate per l'armatura longitudinale e non superiore a 25 cm.

La staffatura deve essere opportunamente infittita nei tratti terminali dei pilastri per una lunghezza non maggiore:

- del lato maggiore della sezione trasversale;
- di un sesto dell'altezza netta del pilastro (di un terzo dell'altezza nel caso di pilastri isostatici);
- di 45 cm.

In corrispondenza dei suddetti tratti, il passo delle staffe non deve eccedere la più piccola delle seguenti dimensioni:

- un quarto del lato minore della sezione trasversale;
- 15 cm.

## 5 APPENDICE A (SULLE TECNICHE DI PRODUZIONE DELLE BARRE)

Le barre di FRP disponibili in commercio per l'impiego come armature lente di getti di calcestruzzo (alcuni esempi sono illustrati in Figura 5-1), sono costituite di fibre di vetro (GFRP), di carbonio (CFRP) o di arammide (AFRP) immerse in resine sia termoindurenti, prese in considerazione nel presente documento, che termoplastiche.

Vengono presentate nel prosieguo le caratteristiche principali delle resine; per quanto riguarda le fibre si rimanda, invece, al documento CNR-DT 200/2004.

Le proprietà delle barre di FRP, quali le prestazioni ad elevate temperature, la resistenza alla corrosione, le proprietà dielettriche, l'infiammabilità e la conducibilità termica, sono determinate principalmente dalle proprietà della matrice.

### **Resine insature poliestere**

Gli elementi di base delle resine insature poliestere sono costituiti da acidi ortoftalici o isoftalici o da anidridi, in combinazione ad anidride maleica ed a vari glicoli. Le resine poliestere devono avere la capacità di gelificarsi ed indurirsi velocemente; in generale nel processo di pultrusione vengono adoperate resine di viscosità pari a 500 cP. Monomeri aventi maggiore viscosità ed inferiore reattività possono essere mescolati a stirene per facilitare i processi di fabbricazione. Il livello dello stirene deve essere tale da garantire una opportuna reticolazione senza residui di stirene (che non hanno preso parte alla reazione di reticolazione) nel materiale composito.

Le resine poliestere esibiscono una buona resistenza alla corrosione rispetto agli idrocarburi alifatici, all'acqua, all'ambiente acido o alcalino. Non presentano invece buona resistenza se esposte ad idrocarburi aromatici, chetoni ed acidi concentrati. Un elevato grado di insaturazione nelle catene del poliestere può causare un restringimento fino al 7% durante il processo di *curing*; tale livello può essere ridotto facendo uso di *filler* o additivi. Le resine poliesteri presentano elevate proprietà di isolamento elettrico e buona resistenza al fuoco; inoltre processi di bromurazione o l'uso di additivi riducono ulteriormente l'infiammabilità e la generazione di fumo.

### **Resine vinilestere**

Le resine vinilestere sono caratterizzate da una miglior resistenza alla corrosione ed alla penetrazione di umidità e da eccellenti proprietà meccaniche ad elevate temperature. Tali resine hanno buone proprietà di resistenza al taglio interlaminare e all'impatto. La struttura chimica delle resine vinilestere è tale da favorire le reazioni all'estremità di ogni catena polimerica piuttosto che lungo lo sviluppo della catena con la conseguenza di avere all'interno di essa elementi rigidi. Ciò comporta una più bassa densità di collegamento e la capacità di resistere ad alte temperature.

### **Resine epossidiche**

Le resine epossidiche sono caratterizzate da una buona resistenza all'umidità ed agli agenti chimici e da ottime proprietà adesive. Sono richieste per le loro elevate proprietà meccaniche, per le eccellenti proprietà elettriche e di resistenza alla corrosione così come per le prestazioni a temperature superiori, fino a circa 150°C. Le resine epossidiche garantiscono resistenza a flessione e a taglio maggiori di quelle delle resine poliesteri e vinilesteri. Tuttavia, richiedono un tempo di reazione per il *curing* piuttosto lungo, che influisce sul rendimento del processo di pultrusione.

### **Resine termoplastiche**

Sono attualmente allo studio barre di composito con matrice termoplastica che presentano il vantaggio di poter essere piegate anche successivamente al processo di produzione mediante opportuni trattamenti termici. Tali resine sono caratterizzate dalla capacità di fluire una volta riscaldate ad una

temperatura superiore a quella di transizione vetrosa nel caso di materiali amorfi e superiore alla temperatura di fusione nel caso di materiali semicristallini. La forma dei componenti può, quindi, essere modificata a piacere, riscaldando semplicemente il materiale ad un'opportuna temperatura (formatura a caldo).

Rispetto alle resine termoindurenti, quelle termoplastiche sono mediamente più tenaci, resistenti all'impatto e duttili. Tali resine presentano temperature di esercizio più elevate e sono inoltre caratterizzate da una migliore resistenza nei confronti dell'umidità e dei fattori ambientali. La principale limitazione al loro uso è rappresentata dall'elevata viscosità, che rende problematica l'impregnazione delle fibre e richiede apparecchiature di lavorazione complesse e costose.

### **Altre tipologie di resine**

Sono disponibili in commercio ulteriori tipologie di resine per applicazioni specifiche. Ad esempio le resine in metilmetacrilato presentano eccellenti caratteristiche meccaniche, bassa viscosità, rapidi tempi di reazione, ottime caratteristiche di resistenza al fuoco ed ai fattori ambientali.

Infine le resine fenoliche sono ricercate per la loro elevata resistenza termica e al fuoco e per la bassa generazione di fumo.

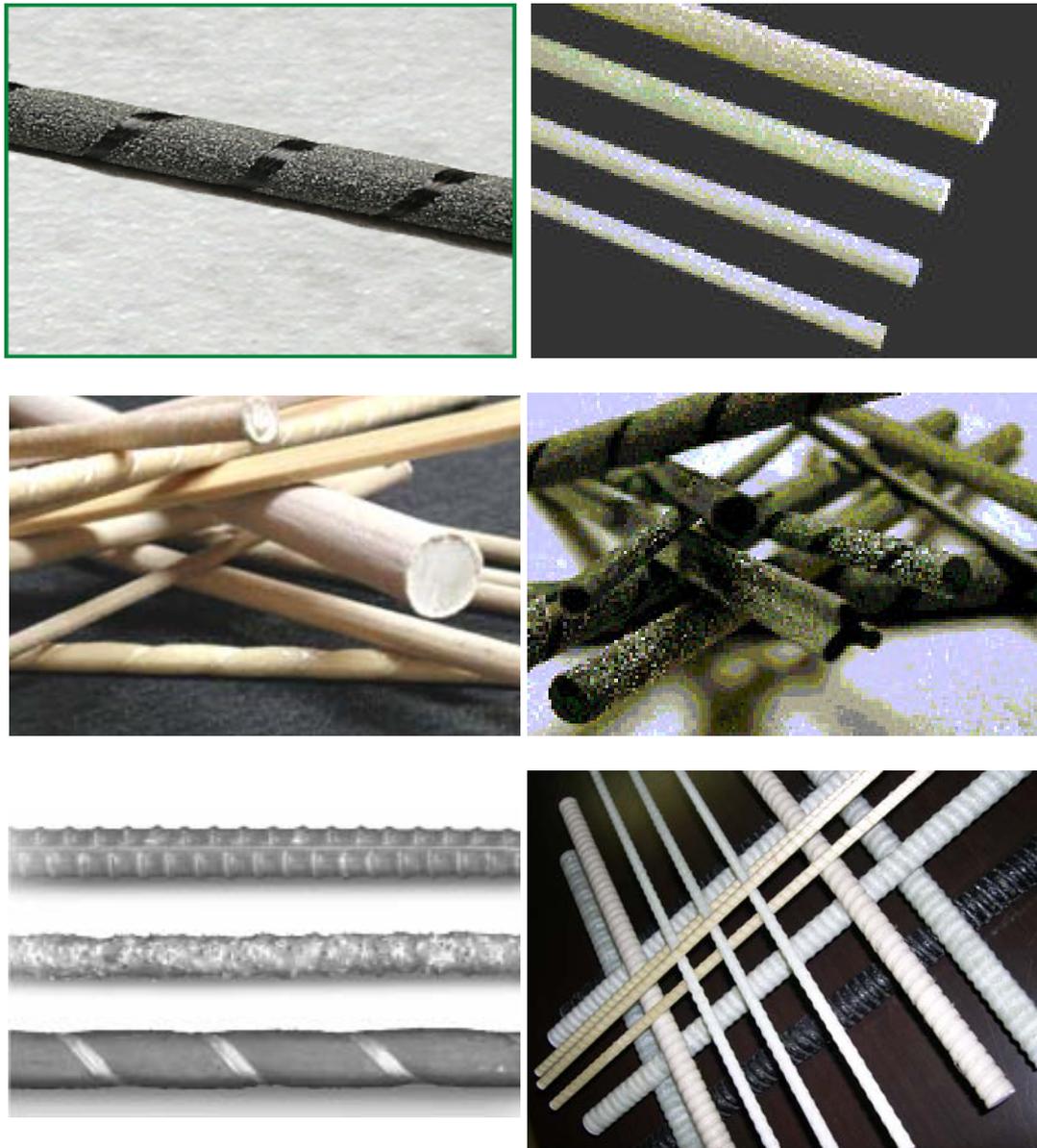
### **I processi di produzione delle barre di FRP**

Le barre di FRP esibiscono comportamento anisotropo e possono essere caratterizzate da differenti tipi di sezione trasversale (rettangolare, rotonda, piena o cava). Esse sono realizzate principalmente mediante processi di pultrusione (si veda il documento CNR-DT 200/2004) a cui possono seguire fasi di intrecciatura o tessitura di filamenti trasversali di fibre attorno alla sezione per produrre diversi sistemi atti ad assicurare una migliore aderenza barra-conglomerato cementizio. Tra di essi si citano quelli per la produzione di nervature ottenute avvolgendo in modo elicoidale filamenti di fibre attorno alla sezione, la smerigliatura delle superfici della barra e le nervature in sola resina ricavate mediante stampaggio.

La disposizione di filamenti di fibre trasversali attorno alla sezione è di notevole importanza per il comportamento a taglio delle barre che, come tutti i laminati fibrorinforzati, presentano una bassa resistenza al taglio interlaminare governata principalmente dalla matrice polimerica. Tali fibre sono abitualmente applicate a conclusione del processo di pultrusione. Una tecnologia alternativa, basata sull'utilizzo di strati di *mat* (ovvero un tessuto costituito da fibre corte orientate in modo casuale) permette di rinforzare la barra in direzione trasversale al proprio asse durante il processo di pultrusione.

Rispetto alle barre metalliche quelle di FRP presentano dei limiti di applicazione dovuti alle difficoltà di ottenere staffe o pezzi sagomati mediante piegatura. Tali elementi possono essere comunque prodotti per stampaggio in appositi impianti, ma nei limiti di determinate forme e dimensioni e con inevitabili costi aggiuntivi. Attualmente le barre di FRP vengono utilizzate prevalentemente sotto forma di barre rettilinee singole o di griglie per la realizzazione di solette, muri e diaframmi. L'utilizzo delle resine termoplastiche sta introducendo nuove possibilità per ovviare ai suddetti inconvenienti ed i primi risultati sono decisamente promettenti rendendo le barre di FRP competitive con quelle metalliche anche sotto tale aspetto.

Fattori quali il volume e l'orientamento delle fibre, la natura di queste ultime e della resina, gli effetti dimensionali ed il controllo di qualità durante la produzione svolgono un ruolo importante nella determinazione delle caratteristiche delle barre di FRP.



**Figura 5-1** – Tipologie di barre di FRP presenti in commercio.

## 6 APPENDICE B (SULLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DELLE BARRE DI FRP)

Nella presente Appendice sono riportate le prove per la caratterizzazione delle barre di FRP, proposte dall'ACI Committee 440 nel documento dal titolo: "Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures" (2004).

### 6.1 DETERMINAZIONE DELLE PROPRIETÀ GEOMETRICHE

La prova di seguito descritta consente la caratterizzazione della sezione equivalente associata alla generica barra di composito.

L'iter della prova richiede il confezionamento di almeno cinque provini di lunghezza pari a 200 mm, preventivamente condizionati secondo la procedura A relativa allo standard ASTM D 618.

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

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

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

Il cilindro adottato deve presentare un'altezza sufficiente a contenere l'intera barra e a garantire un opportuno franco per la misura della variazione di volume. Inoltre esso deve essere graduato con un intervallo di misura non inferiore a 10 ml.

Al fine di valutare l'area della sezione equivalente associata alla barra testata,  $A_p$ , è necessario determinare la sua lunghezza media,  $l_p$ . Quest'ultima è assunta pari al valore medio delle lunghezze di tre generatrici, sfalsate rispettivamente di 120°. La misura di tali lunghezze deve essere effettuata con un calibro di precisione almeno pari a 0.025 mm.

Nota la lunghezza media dei provini  $l_p$ , si può valutare l'area della sezione equivalente competente alla generica barra in esame utilizzando la relazione:

$$A_p = \frac{V_1 - V_0}{l_p}, \quad (6.1)$$

dove  $V_0$  e  $V_1$  sono, rispettivamente, il volume iniziale e finale del liquido, quest'ultimo misurato a seguito dell'immersione del composito.

Eseguendo la prova di immersione per tutti i campioni di FRP confezionati, si giunge alla definizione del valore medio dell'area equivalente della sezione retta,  $A_b$ , che caratterizza pertanto la geometria della barra di FRP. Il corrispondente diametro viene indicato, per analogia, con il simbolo  $d_b$ .

### 6.2 DETERMINAZIONE DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE

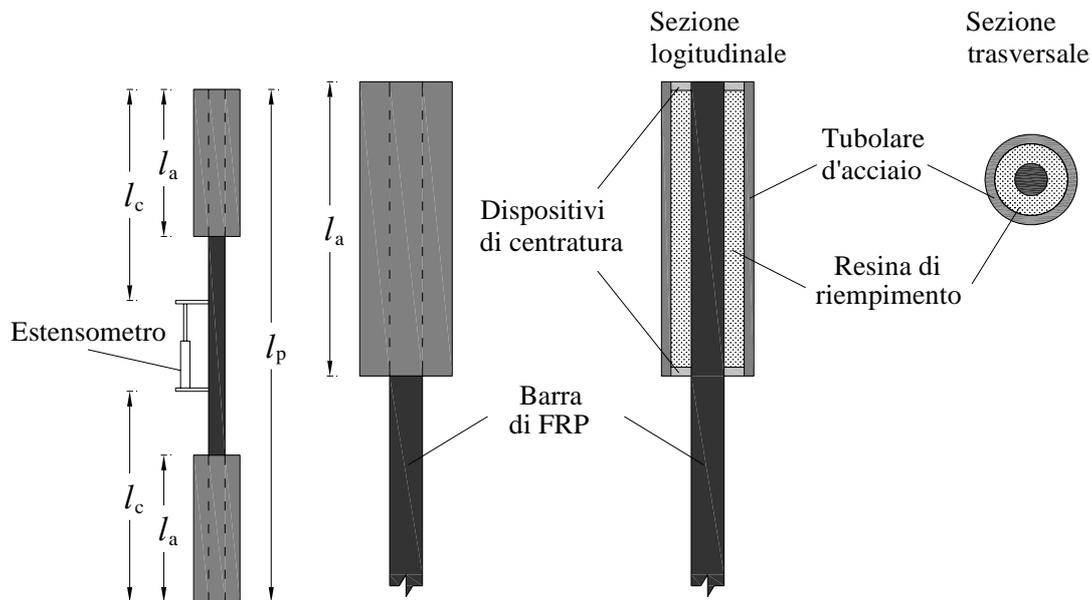
Nel presente paragrafo è riportata nelle sue linee essenziali la prova di identificazione delle proprietà meccaniche di una barra di composito.

Anche per l'esecuzione di questo test sono richieste condizioni ambientali standard di laboratorio: temperatura di 23±3 °C e umidità relativa del 50±10 % nonché il confezionamento di almeno cinque provini di FRP, preventivamente condizionati secondo la procedura A relativa allo standard ASTM D 618 (§ 6.1) e stagionati in laboratorio per almeno 24 ore.

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

$$\begin{aligned} l_p &\geq 100 + 2 \cdot l_a && \text{[lunghezze in mm]}, \\ l_p &\geq 40 \cdot d_b + 2 \cdot l_a, \end{aligned} \quad (6.2)$$

essendo  $l_a$  e  $d_b$ , rispettivamente, la lunghezza di afferraggio ed il diametro della barra (Figura 6-1), quest'ultimo valutato in accordo con quanto definito al § 6.1.



**Figura 6-1** – Particolare dell'afferraggio.

La caratterizzazione delle barre viene condotta mediante una prova monotona di trazione a controllo di forza, di deformazione o di spostamento.

I requisiti richiesti per il dispositivo di trazione sono una risoluzione di 100 N, nel caso di prova in controllo di forza, di 0.01 ‰, nel caso di prova in controllo di deformazione, e di 0.001 mm, nel caso di prova in controllo di spostamento. Il gradiente di applicazione del carico, della deformazione o dello spostamento, deve essere costante per tutta la durata del test e di entità tale da garantire l'espletamento di quest'ultimo in un intervallo di tempo compreso tra 1 e 10 minuti.

Le deformazioni esibite dalle barre nel corso della prova possono essere misurate in corrispondenza della sezione di mezzeria mediante estensimetri o estensometri.

In quest'ultimo caso è richiesta una precisione non inferiore a 0.02 ‰ della base di misura, la quale non può essere inferiore a otto volte il diametro equivalente della barra ( $8 d_b$ ); inoltre, con riferimento alla Figura 6-1, deve risultare:  $l_c \geq l_a + 8 d_b$ .

Al termine di ciascuna prova si può pervenire ad un diagramma forza-deformazione da cui è desumibile la tensione di rottura,  $f_{fu,p}$ , mediante la relazione:

$$f_{fu,p} = F_{fu,p} / A_b, \quad (6.3)$$

dove  $F_{fu,p}$  e  $A_b$  rappresentano, rispettivamente, la forza di rottura registrata e l'area del provino, quest'ultima valutata secondo quanto riportato al § 6.1.

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

$$E_{f,p} = \frac{F_1 - F_2}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot A_b}, \quad (6.4)$$

in cui con  $F_1$  ed  $\varepsilon_1$  si sono indicate, rispettivamente, la forza e la deformazione corrispondenti al 50% della tensione di rottura; con  $F_2$  ed  $\varepsilon_2$ , rispettivamente, la forza e la deformazione corrispondenti al 20% della tensione di rottura.

La deformazione ultima del campione testato,  $\varepsilon_{fu,p}$ , può essere determinata attraverso la seguente relazione:

$$\varepsilon_{fu,p} = \frac{F_{fu,p}}{E_{f,p} \cdot A_b}. \quad (6.5)$$

A partire dai parametri meccanici così ottenuti per i singoli provini, si può risalire agevolmente ai valori caratteristici delle proprietà meccaniche della barra di FRP, in accordo con quanto definito al § 4.4.3.

## 7 APPENDICE C

### 7.1 SCHEDE TECNICA TIPO PER LE BARRE DI FRP

(1) Di seguito viene proposta, a titolo di esempio, la struttura di una scheda tecnica tipo per barre di FRP, in analogia a quanto già riportato nel documento tecnico CNR-DT 200/2004 per i sistemi preformati per il rinforzo esterno. Le schede tecniche delle barre di FRP attualmente in commercio potrebbero includere anche altre informazioni o riportare solo parte di quelle appresso indicate. La struttura proposta risulta comunque esaustiva per numero e tipo di informazioni fornite.

#### SCHEDA TECNICA: barre di FRP per armatura ordinaria di strutture di cemento armato

IL PRODUTTORE DEVE RIPORTARE I VALORI STATISTICI NECESSARI PER LA VALUTAZIONE DELLE RESISTENZE CARATTERISTICHE (AD ESEMPIO MEDIA, SCARTO QUADRATICO MEDIO, POPOLAZIONE, FRATTILE, INTERVALLO DI CONFIDENZA).

#### Descrizione

Nome commerciale, tipo di fibra, tipo di resina, tecnologia di produzione, marchiatura ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

#### Caratteristiche geometriche e fisiche

Proprietà	Unità di misura	Metodo di prova normativa di riferimento	Note
geometria della sezione delle barre		Appendice B	
area nominale delle barre	mm <sup>2</sup>	Appendice B	
perimetro nominale delle barre	mm	Appendice B	(1)
colore			
densità	fibra	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183-1:2004(E)
	matrice	g/cm <sup>3</sup>	
contenuto di fibra	in peso	%	ISO 11667:1997(E)
	in volume	%	
temperatura di transizione vetrosa della resina (T <sub>g</sub> )	°C	ISO 11357-2:1999(E) (DSC) ISO 11359-2:1999(E) (TMA) ASTM E1640 (DMA)	
temperatura limite massima di utilizzo	°C		
conducibilità elettrica	S/m		

(1) Valore utile per il calcolo della lunghezza di ancoraggio nel caso di barre di sezione non circolare.

(2) Valore utile per il calcolo della frazione in peso di fibra quando è nota quella in volume o viceversa.

#### Proprietà

Proprietà	Unità di misura	Metodo di prova normativa di riferimento	Note
modulo di elasticità normale a trazione	GPa	Appendice B / ISO 527-4,5:1997(E)	
resistenza a trazione (valore medio e caratteristico)	MPa	Appendice B / ISO 527-4,5:1997(E)	
deformazione a rottura a trazione	%	Appendice B / ISO 527-4,5:1997(E)	
resistenza a <i>creep</i>		ISO 899-1:2003(E)	(3)
rilassamento (barre, cavi)			(4)
aderenza: tensione tangenziale (barre, cavi)		prova di <i>pull-out</i>	(4)

%

(3) La ISO 899-1:2003(E) è la Normativa di riferimento generale per la determinazione del comportamento a *creep* di materiali polimerici rinforzati (compositi) o non, mentre per le barre per armatura ed i cavi di precompressione è in preparazione una norma ISO (TC71/SC6N): "Non-conventional reinforcement of concrete - Test methods-Part 1: Fiber reinforced polymer (FRP) bars and grids" in cui è proposta una prova specifica per le barre di FRP ("Test Method for creep failure"). In alternativa esiste una prova proposta nel documento ACI 440.3R-04 "Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures" dal titolo: "Test Method for creep rupture of FRP bars"

(4) Nella norma ISO (TC71/SC6N) riguardante barre e cavi di FRP sono proposte le due seguenti prove: "Test method for bond strength by pull-out testing" per l'aderenza e "Test Method for long-term relaxation" per il rilassamento. Prove analoghe sono previste nel documento ACI 440.3R-04

### **Condizioni di Stoccaggio**

Descrizione

### **Precauzioni d'uso e sicurezza**

Descrizione

## **7.2 QUALIFICAZIONE DI LIVELLO 1: PROPRIETÀ FISICO-MECCANICHE**

(1)P I campioni su cui effettuare le prove di qualificazione devono essere costituiti da spezzoni di barre estratti dalla produzione secondo criteri definiti.

In Tabella 7-1 sono riportate le prove di caratterizzazione più comuni e le corrispondenti norme tecniche maggiormente utilizzate (ISO ed ASTM).

**Tabella 7-1** –Caratteristiche meccaniche e fisiche dei compositi.

Proprietà	Normativa di riferimento da verificare	
	ISO	ASTM
<b>Proprietà meccaniche</b>		
modulo di elasticità normale a trazione*	527-4, 5:1997(E)	D3039-00, D5083-02, D3916-02
resistenza a trazione*	527-1, 4, 5:1997(E)	D3039-00, D5083-02, D3916-02
deformazione a rottura a trazione*	527-1, 4, 5:1997(E)	D3039-00, D5083-02, D3916-02
resistenza a <i>creep</i>	899-1:2003(E)	D2990-01
<b>Proprietà fisiche</b>		
densità	1183-1:2004(E)	D792-00
coefficiente di dilatazione termica	11359-2:1999(E)	E831, D696
temperatura di transizione vetrosa (della matrice)	11357-2:1999(E) (DSC) 11359-2:1999(E) (TMA)	E1356, E1640
contenuto di fibre	11667:1997(E)	D3171, D2584

\* Vedasi anche l'Appendice B.

(2)P È possibile integrare le prove di qualificazione delle barre con quelle relative ai singoli componenti, fibre e resina (si veda il § 2.4.1 del documento tecnico CNR-DT 200/2004).

## **7.3 QUALIFICAZIONE DI LIVELLO 2: PROPRIETÀ A LUNGO TERMINE**

(1)P Si possono distinguere tre tipi di comportamento nel tempo in relazione:

- ai fenomeni di degrado chimico;

- ai fattori ambientali (es. cicli di gelo-disgelo);
- alla modalità di applicazione del carico: costante (*creep*) o variabile (fatica).

Le prove devono essere eseguite su provini di geometria opportuna, ricavati dal campione di riferimento secondo le modalità precedentemente descritte. La geometria del provino dipende dal particolare tipo di prova che si intende eseguire.

Per i primi due tipi di comportamento, le prove sono eseguite su provini sottoposti preventivamente a trattamenti di condizionamento termico o ambientale. Dopo aver condizionato il provino per un tempo opportuno, è possibile determinare la proprietà meccanica o fisica di interesse come prescritto dalla normativa ISO (o ASTM).

Se la variazione nel tempo di una particolare proprietà è correlata al degrado chimico del materiale, è possibile prevedere il valore che le compete ad un certo istante di tempo applicando la procedura di Arrhenius, estrapolando cioè i risultati di prove condotte a breve termine ed a temperatura elevata. Si rileva che i valori così ottenuti non tengono assolutamente conto dell'effetto di sforzi agenti sul materiale o di fattori ambientali, quali l'esposizione prolungata a raggi ultravioletti, acidi, alcali, sali e altri agenti aggressivi di varia natura.

L'analisi del comportamento a lungo termine del materiale sottoposto a carico costante richiede l'esecuzione di prove di *creep*: la normativa di riferimento per i materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica è la ISO 899-1:2003(E); in alternativa ci si può riferire alla ASTM D2990-01.

Per il comportamento a fatica, la normativa di riferimento è la ISO 13003-2003(E) o la ASTM D 3479-02.

## 8 APPENDICE D

### 8.1 COMPITI E RESPONSABILITÀ DEGLI OPERATORI NELLA SCELTA E NEL CONTROLLO DELLE BARRE DI FRP

#### Progettista

- Deve indicare chiaramente nel progetto la qualità e le caratteristiche (geometriche, meccaniche e fisiche) delle barre di FRP specificandone, dove necessario, i requisiti minimi di accettazione.
- Deve specificare i criteri di accettazione delle barre di FRP indicando al direttore dei lavori i prelievi e le prove da effettuare. Ad esempio, può suggerire di eseguire delle prove per verificare alcune o tutte le caratteristiche geometriche, meccaniche e fisiche fornite dal produttore nelle schede tecniche.

#### Impresa appaltatrice

- Deve adottare le barre di FRP aventi le caratteristiche indicate dal progettista, acquistate presso produttori che assicurino la qualità dei prodotti.
- Deve verificare che i prodotti siano accompagnati da schede tecniche esaurienti, riportanti i valori delle caratteristiche meccaniche e fisiche, ed eventualmente da certificati di collaudo in laboratorio.
- Deve verificare che i prodotti siano conformi alle prescrizioni indicate dal progettista e, nel caso non siano disponibili materiali con i requisiti indicati, deve concordare possibili alternative con il progettista e/o con il direttore dei lavori.

#### Direttore dei lavori

- Svolge un ruolo decisionale sull'accettazione dei prodotti.
- Deve verificare, sia in fase di appalto delle forniture che al momento della consegna, la rispondenza del materiale fornito con le prescrizioni del progettista.
- Deve verificare la provenienza del materiale fornito. Le barre di FRP possono riportare un marchio del produttore od essere fornite in fasci muniti di etichette o cartellini recanti le informazioni necessarie per la loro rintracciabilità.
- Deve verificare le caratteristiche geometriche, meccaniche e fisiche dei prodotti mediante i certificati di prova della fornitura.
- Può richiedere l'esecuzione di prove sperimentali per valutare la qualità dei materiali e verificare la corrispondenza dei risultati con i valori forniti dal produttore. Tali prove sono da eseguirsi presso laboratori con provata esperienza e dotati di attrezzature idonee alla caratterizzazione di materiali fibrorinforzati. I criteri di accettazione possono essere basati sulla massima deviazione ammissibile dei risultati ottenuti rispetto ai valori conseguiti durante i controlli di produzione. In tal caso è necessario assicurarsi che le procedure di prova siano le stesse. In alcuni casi particolari è possibile che siano richieste prove per la determinazione delle caratteristiche meccaniche e fisiche da eseguirsi sia su campioni semplici che su campioni precondizionati per verificare, ad esempio, la permanenza delle caratteristiche al variare della temperatura o dell'umidità.

#### Laboratori di prova

- Devono essere di provata esperienza nella caratterizzazione sperimentale di materiali fibrorinforzati.
- Devono essere dotati di attrezzature di misura e di prova adeguate.
- Devono svolgere le prove sperimentali secondo le procedure indicate in norme specifiche per i materiali fibrorinforzati ed in particolare per le barre di FRP.

- Devono rilasciare dettagliati rapporti di prova riportanti tutte le informazioni relative alla strumentazione di prova ed i risultati.
- Devono essere dotati di un manuale di qualità e svolgere le attività sperimentali secondo procedure di prova in accordo con le norme per la qualità dei laboratori di prova (EN-ISO17025 “Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e di taratura”).

#### Collaudatore

- Deve verificare la qualità dei materiali impiegati mediante i certificati di accompagnamento alle forniture.
- Deve verificare l'accettazione dei materiali da parte del direttore dei lavori.
- Deve verificare i risultati delle eventuali prove sperimentali di accettazione richieste dal direttore dei lavori.

## 9 APPENDICE E (SUL CALCOLO DELLA FRECCIA E DELL'APERTURA DELLE FESSURE IN ELEMENTI INFLESSI DI CALCESTRUZZO ARMATO CON BARRE DI FRP)

Viene riportata di seguito la procedura da eseguire da parte del produttore che intenda caratterizzare mediante prove sperimentali l'aderenza delle barre ai fini di una valutazione più accurata delle frecce e dell'apertura delle fessure, come previsto nei §§ 4.7.3.3 e 4.7.3.4.

Per quanto riguarda la valutazione delle frecce ci si deve riferire ad una formula del tipo:

$$f = f_1 \cdot \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^m + f_2 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^m \right], \quad (9.1)$$

dove le quantità introdotte sono già state definite nel § 4.7.3.3.

Sulla base di una popolazione costituita da almeno cinque elementi armati con barre di FRP e sottoposti a prove di flessione su quattro punti, si misurano le frecce e l'apertura delle fessure esibite per fissati valori di carico, garantendo per la singola prova un numero di acquisizioni non inferiore a cinque nell'intervallo compreso tra il 20 % e il 60 % del carico di rottura.

Per gli stessi valori del carico si valutano le frecce teoriche a partire dalla (9.1).

Dal confronto dei risultati analitici con quelli sperimentali, mediante un'opportuna analisi statistica, quale ad esempio quella basata sul metodo della massima verosimiglianza, si determina l'esponente  $m$ .

Una volta determinato quest'ultimo, si confrontano i valori sperimentali delle aperture delle fessure esibiti dagli elementi sottoposti a prova ed i corrispondenti valori teorici dedotti dalla (4.9), attribuendo alle quantità in essa presenti il valore di  $m$  sopra ottenuto ed ai coefficienti  $\beta_1$  e  $\beta_2$  il valore unitario.

Analogamente a quanto già esposto per l'esponente  $m$ , il coefficiente  $k_1$ , definito nella (4.10), è determinato mediante un'opportuna analisi statistica, nel rispetto della limitazione:  $k_1 \geq 0.8$ .

Il presente Documento Tecnico è stato predisposto da un Gruppo di studio così composto:

ASCIONE Prof. Luigi	- Università di Salerno
BENEDETTI Prof. Andrea	- Università di Bologna
BERARDI Ing. Valentino Paolo	- Università di Salerno
CERSOSIMO Ing. Giuseppe	- Interbau S.r.l.- Milano
COSENZA Prof. Edoardo	- Università "Federico II"- Napoli
FRASSINE Prof. Roberto	- Politecnico di Milano
FEO Prof. Luciano	- Università di Salerno
FICO Ing. Raffaello	- Università "Federico II"- Napoli
GIAMUNDO Dott. Aniello	- ATP Pultrusion - Angri (SA)
GREMEL Ing. Doug	- Hughes Brothers - Nebraska, U.S.A.
GRIMALDI Prof. Antonio	- Università "Tor Vergata" - Roma
MACERI Prof. Franco	- Università "Tor Vergata" - Roma
MANFREDI Prof. Gaetano	- Università "Federico II"- Napoli
MONTI Prof. Giorgio	- Università "La Sapienza" - Roma
NANNI Prof. Antonio	- Università "Federico II"- Napoli
PISANI Prof. Marco Andrea	- Politecnico di Milano
PARRETTI Ing. Renato	- Università "Federico II"- Napoli
PECCE Prof. Maria Rosaria	- Università del Sannio - Benevento
POGGI Prof. Carlo	- Politecnico di Milano
PROTA Ing. Andrea	- Università "Federico II"- Napoli
SAVOIA Prof. Marco	- Università di Bologna
VAGO Sig. Giuseppe	- Sireg - Arcore (MI)

Coordinatore:

GRIMALDI Prof. Antonio.

Coordinatore generale della collana di documenti sull'impiego strutturale degli FRP:

ASCIONE Prof. Luigi.

Segreteria:

FEO Prof. Luciano, ROSATI Prof. Luciano.

Il presente Documento di Studio è stato approvato in data 26/01/2006 dalla “Commissione incaricata di formulare pareri in materia di normativa tecnica relativa alle costruzioni” così composta:

ANGOTTI Prof. Franco	- Università di Firenze
ASCIONE Prof. Luigi	- Università di Salerno
BARATTA Prof. Alessandro	- Università “Federico II”- Napoli
CECCOLI Prof. Claudio	- Università di Bologna
COSENZA Prof. Edoardo	- Università “Federico II”- Napoli
GIANGRECO Prof. Elio	- Università “Federico II”- Napoli
JAPPELLI prof. Ruggiero	- Università “Tor Vergata” - Roma
MACERI Prof. Franco	- Università “Tor Vergata” - Roma
MAZZOLANI Prof. Federico Massimo	- Università “Federico II”- Napoli
PINTO Prof. Paolo Emilio	- Università “La Sapienza” - Roma
POZZATI Prof. Piero	- Università di Bologna
SOLARI Prof. Giovanni	- Università di Genova
URBANO Prof. Carlo	- Politecnico di Milano
ZANON Prof. Paolo	- Università di Trento