

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

COMMISSIONE DI STUDIO PER LA PREDISPOSIZIONE E L'ANALISI
DI NORME TECNICHE RELATIVE ALLE COSTRUZIONI

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



CNR-DT 203/2006

Proprietà letteraria riservata
del

Consiglio Nazionale delle Ricerche

INDICE

1	PREMESSA	1
1.1	PREMESSA ALLA VERSIONE DEFINITIVA DEL DOCUMENTO A CONCLUSIONE DELL'INCHIESTA PUBBLICA.....	3
2	INTRODUZIONE	3
2.1	SIMBOLOGIA.....	4
3	MATERIALI	6
3.1	TECNICHE DI PRODUZIONE.....	6
3.2	CARATTERISTICHE DELLE BARRE DI FRP.....	6
3.2.1	Proprietà geometriche.....	6
3.2.2	Resistenza e modulo di elasticità a trazione in direzione longitudinale (asse delle barre).....	6
3.2.3	Coefficienti di dilatazione termica.....	7
3.2.4	Fatica statica.....	8
3.2.5	Aderenza barra-calcestruzzo.....	8
3.3	CARATTERISTICHE DELLE GRIGLIE DI FRP.....	8
3.4	SCHEDE TECNICHE PER LE BARRE DI FRP.....	9
3.5	CERTIFICAZIONE E CONTROLLO DELLA PRODUZIONE.....	9
3.6	ACCETTAZIONE.....	9
4	CONCETTI BASILARI DEL PROGETTO	10
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.....	11
4.4.1	Generalità.....	11
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 γ_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 η_a	13
4.6.2	Modalità di carico e fattore di conversione per effetti di lunga durata η_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.....	15
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.....	18
4.7.3.3	Verifica delle frecce.....	18
4.7.3.4	Verifica dell'apertura delle fessure.....	19
4.8	TAGLIO.....	21
4.8.1	Generalità.....	21

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.....	22
4.8.3 Armatura minima.....	22
4.9 ARMATURA SECONDARIA CON FRP	22
4.10 LUNGHEZZA DI ANCORAGGIO	22
4.11 PARTICOLARI COSTRUTTIVI.....	23
5 APPENDICE A (SULLE TECNICHE DI PRODUZIONE DELLE BARRE E DELLE GRIGLIE)	25
5.1 BARRE DI FRP.....	25
5.2 GRIGLIE DI FRP	27
6 APPENDICE B (SULLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DELLE BARRE DI FRP)	28
6.1 DETERMINAZIONE DELLE PROPRIETÀ GEOMETRICHE.....	28
6.2 DETERMINAZIONE DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE.....	28
7 APPENDICE C.....	31
7.1 SCHEDE TECNICA TIPO PER LE BARRE DI FRP.....	31
8 APPENDICE D.....	33
8.1 COMPITI E RESPONSABILITÀ DEGLI OPERATORI NELLA SCELTA E NEL CONTROLLO DELLE BARRE DI FRP	33
9 APPENDICE E (SUL CALCOLO DELLA FRECCIA E DELL'APERTURA DELLE FESSURE IN ELEMENTI INFLESSI DI CALCESTRUZZO ARMATO CON BARRE DI FRP)	35

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: dal più recente a quello più datato, essi sono il documento edito dal *fib* (Task Group 9.3, 2005), quello edito dall'*American Concrete Institute* (ACI 440.1R-03, 2003), i due documenti pubblicati in Canada (CAN/CSA-S6-02, 2002 per edifici e CAN/CSA-S6-00, 2000 per ponti) ed infine il documento giapponese (JSCE, 1997).

I riferimenti bibliografici completi sono i seguenti:

- *fib*, 2005, "FRP Reinforcement for RC Structures", Task Group 9.3 (*Fibre Reinforced Polymer*) Reinforcement for Concrete Structures, Lausanne, Switzerland;
- 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-S6-02, 2002, "Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers," CAN/CSA S806-02, Canadian Standards Association, Rexdale, Canada;
- CAN/CSA-S6-00, 2000, "Canadian High Bridge Design Code," Clause 16.8.6, Canadian Standard Association (CSA) International, Toronto, Ontario, Canada;
- 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.

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

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

Si è già detto della loro proprietà di non essere suscettibili ai fenomeni di corrosione che li rende potenzialmente utili per le costruzioni marine e per quelle esposte ad ambienti molto aggressivi. Inoltre, 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 inducono alla scelta degli FRP possono essere legate non solo all'esigenza di garantire un'adeguata durabilità dell'opera, ma anche alla possibilità di avvalersi di ulteriori specifiche proprietà dei compositi fibrorinforzati, quali ad esempio la trasparenza magnetica. Quest'ultima proprietà può infatti risultare utilissima in determinate circostanze, come ad esempio nella realizzazione di sale ospedaliere, allo scopo di evitare interferenze con le più moderne attrezzature per la risonanza magnetica e per la diagnostica ad immagini.

Altre possibili applicazioni, che appaiono come particolarmente promettenti ed attrattive, riguardano le strutture a carattere provvisoriale e i rivestimenti delle gallerie.

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 di essere in grado di 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.

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

-1998-2000: Ricerca PRIN dal titolo: "I materiali compositi nelle costruzioni civili", Coordinatore Nazionale: Prof. Luigi Ascione;

- 2000-2002: Ricerca PRIN dal titolo: "Rinforzo strutturale del costruito con materiali compositi: individuazione di linee guida progettuali per l'affidabilità e la durabilità", Coordinatore Nazionale: Prof. Luigi Ascione;

- 2002-2004: Ricerca PRIN dal titolo: "Rinforzo attivi e passivi con l'utilizzo di materiali compositi nel costruito e per l'innovazione tecnologica nelle costruzioni civili", Coordinatore Nazionale: Prof. Luigi Ascione;

- 2002-2003: Ricerca PRIN dal titolo: "L'impiego dei compositi nel rinforzo sismico di strutture in cemento armato", Coordinatore Nazionale: Prof. G. Manfredi;

- 2003-2005: Ricerca PRIN dal titolo: "L'impiego di materiali con microstruttura per l'innovazione tecnologica delle strutture civili", Coordinatore Nazionale: Prof. Franco Maceri;

- 2003-2005: Ricerca PRIN dal titolo: "Comportamento e criteri di progetto nell'adeguamento con compositi di strutture in c.a.", Coordinatore Nazionale: Prof. Antonio Nanni;

- 2003-2005: Ricerca dal titolo "Modellazione di materiali innovativi per la salvaguardia strutturale", (Coordinatore: Prof. Luigi Ascione), nell'ambito del Progetto Strategico MIUR (legge 449/97) dal titolo "Diagnosi e salvaguardia di manufatti architettonici con particolare riferimento agli effetti derivanti da eventi sismici ed altre calamità naturali", Coordinatore Nazionale: Prof. Franco Maceri;

- 2003-2005: Ricerca dal titolo "Effetti delle proprietà reologiche dei materiali compositi negli interventi strutturali per l'ingegneria civile" (Coordinatore: Prof. Marco Savoia) nell'ambito del Progetto Strategico MIUR (legge 449/97) dal titolo "Materiali compositi per applicazioni strutturali di rilevante interesse industriale", Coordinatore Nazionale: Prof. Sesto Viticoli;

- 2003-2005 Ricerca dal titolo "Strutture in materiale composito" (Coordinatore: prof. Franco Marceri) nell'ambito del Progetto Strategico MIUR (legge 449/97) dal titolo "Materiali compositi per applicazione strutturali di rilevante interesse industriale", Coordinatore nazionale prof. Sesto Viticoli;
- 2003: Centro di Eccellenza su "Compositi strutturali per applicazioni innovative nell'ingegneria civile", con sede presso l'Università di Napoli, Responsabile: Prof. Edoardo Cosenza.

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

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 bibliografia disponibile sull'argomento. A loro è comunque lasciata la responsabilità finale delle scelte operate.

Si ritiene utile segnalare fin d'ora che gli elementi di conglomerato cementizio armato con barre di FRP hanno un comportamento essenzialmente elastico, per cui non sono applicabili quei metodi dell'analisi strutturale che presuppongono una capacità di redistribuzione plastica.

Conseguentemente, un'attenzione particolare è richiesta per le applicazioni in zona sismica, laddove deve essere tenuta in debita considerazione la quasi totale assenza di duttilità nelle strutture così realizzate.

A tal riguardo, nel caso di elementi strutturali primari, cui sia affidata la funzione di fronteggiare l'azione sismica, lo spettro di progetto deve essere ricavato da quello elastico attribuendo un valore opportunamente contenuto al fattore di struttura.

1.1 PREMESSA ALLA VERSIONE DEFINITIVA DEL DOCUMENTO A CONCLUSIONE DELL'INCHIESTA PUBBLICA

Il documento è stato sottoposto a inchiesta pubblica. A seguito di essa sono state introdotte modifiche e/o integrazioni al testo.

Si ringraziano quanti, dal mondo delle Professioni, delle Istituzioni, dell'Industria e dell'Università, hanno partecipato in modo attivo ad un processo che, legittimamente, deve competere all'intera comunità tecnica e scientifica di un Paese moderno ed avanzato.

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 di tipo tradizionale, interamente realizzata con barre di acciaio.

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

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

2.1 SIMBOLOGIA

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

Notazioni generali

- (.)_c valore della grandezza (.) riferita al calcestruzzo
- (.)_d valore di progetto (o di calcolo) della grandezza (.)
- (.)_f valore della grandezza (.) riferita al composito fibrorinforzato
- (.)_k valore caratteristico della grandezza (.)
- (.)_R valore della grandezza (.) vista come resistenza
- (.)_S valore della grandezza (.) vista come sollecitazione

Lettere romane maiuscole

- A_b area equivalente della barra di FRP
- 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
- A_p area equivalente del provino di FRP
- 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
- T_g temperatura di transizione vetrosa della resina
- 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 equivalente 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

γ_m	coefficiente parziale per materiali o prodotti
γ_{Rd}	coefficiente parziale per i modelli di resistenza
ε_c	deformazione del calcestruzzo al lembo compresso
ε_{cu}	deformazione ultima del calcestruzzo
ε_f	deformazione della barra di FRP
ε_{fd}	deformazione massima di progetto della barra di FRP
ε_{fk}	deformazione caratteristica a rottura per trazione della barra di FRP
ρ_l	rapporto di armatura per armatura longitudinale
σ_c	tensione nel calcestruzzo
σ_f	tensione nella barra di FRP
τ_{Rd}	tensione di rottura di calcolo a taglio

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 e frazioni volumetriche di fibre non inferiori 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 che hanno influenza 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 e delle griglie 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 (o nominale), 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 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, limitatamente alle barre di piccolo diametro, la regola delle miscele per la determinazione dei competenti valori delle caratteristiche meccaniche di rigidezza 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 tecnica di produzione. I competenti valori forniti dai produttori devono perciò essere basati su criteri del tipo di quelli descritti 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 disposti all'interno di 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 farà 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.

(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, α_l , e trasversale, α_t , sono strettamente correlati a quelli delle singole fasi (matrice e fibre) che costituiscono il materiale composito.

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

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

(2) Valori tipici dei coefficienti di dilatazione termica longitudinale e trasversale, rispettivamente α_l e α_t , sono riportati in Tabella 3-1, relativamente a barre di composito con una frazione volumetrica di fibre compresa tra il 50% ed il 70%.

Tabella 3-1 – Coefficienti di dilatazione termica.

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

(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).

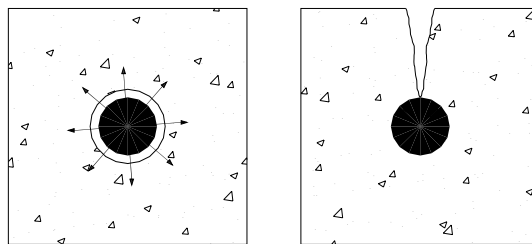


Figura 3-1 – Fessurazione indotta dalle tensioni circonferenziali.

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 in conseguenza della dilatazione trasversale delle barre o lo sfilamento di queste ultime per effetto della loro contrazione trasversale, si suggerisce di adottare un ricoprimento di calcestruzzo adeguatamente consistente (§ 4.1.1).

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 limitarne opportunamente lo stato di cemento (§ 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, dipendenti dalla geometria della barra, dalle proprietà chimico-fisiche della sua superficie e dalla classe di resistenza del calcestruzzo. Tale ultimo parametro è, nel caso delle barre 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 alla suddetta 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 forfettario, dei fenomeni connessi all'aderenza calcestruzzo-barra di FRP.

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 CERTIFICAZIONE E CONTROLLO DELLA PRODUZIONE

(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 geometriche, meccaniche e fisiche.

Più specificamente:

- il sistema di controllo della produzione in fabbrica (FPC : *Factory Production Control*) deve includere la valutazione delle proprietà geometriche, fisiche e meccaniche dei prodotti finiti come descritto nei successivi paragrafi;
- il produttore di barre deve utilizzare elementi base (fibre e resine) certificati dai relativi fornitori e quindi anch'essi soggetti a controlli continui della produzione.

(2)P Il campionamento e la sperimentazione di campioni di prodotto devono essere eseguiti regolarmente su lotti di produzione di quantità predefinita. Le prove meccaniche e fisiche devono essere condotte da personale qualificato con comprovata esperienza nella caratterizzazione dei materiali compositi e devono essere eseguite utilizzando attrezzature di prova idonee ed opportunamente tarate. Nel caso che il produttore non disponga di un laboratorio interno, questi deve rivolgersi a laboratori qualificati nella caratterizzazione dei materiali compositi.

Le caratteristiche meccaniche riportate nelle schede tecniche dei prodotti devono essere ricavate su base statistica. I registri di controllo della produzione devono riportare tutti i dati statistici, quali il numero dei campioni esaminati, i valori medi, gli scarti quadratici ed ogni altra informazione significativa. Ai suddetti valori caratteristici vanno applicati gli opportuni coefficienti parziali del metodo semiprobabilistico.

(3) Alcune prove sperimentali per la determinazione delle caratteristiche meccaniche delle barre di FRP sono descritte in Appendice C. Per ulteriori esigenze è possibile fare riferimento a normative specifiche internazionali quali quelle dell'ACI, dell'ISO e dell'ASTM.

3.6 ACCETTAZIONE

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

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

In Appendice D sono dettagliati 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 rigidità forniti da barre compresse di FRP o dai tratti di esse soggette a tensioni di compressione.

(3)P Un'attenzione particolare è richiesta nell'analisi strutturale, poiché la quasi totale assenza di duttilità delle strutture di calcestruzzo armato con barre di FRP deve essere tenuta in debita considerazione. In particolare non si possono adottare analisi strutturali di tipo elasto-plastico od elastico con redistribuzione.

(4)P Di norma vanno eseguite specifiche verifiche di resistenza al fuoco degli elementi strutturali, in accordo con la vigente Normativa antincendio. Esse devono tenere conto del valore della temperatura di transizione vetrosa, T_g .

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.

(5) È ammesso l'utilizzo di armature piegate purché siano adottati i provvedimenti di cui al § 4.11.

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 provvisorio, 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 presente documento.

(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, ed in particolare di una barra di FRP, 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, η è un fattore di conversione che tiene conto, in maniera moltiplicativa, di problemi speciali di progetto, γ_m è infine il coefficiente parziale del materiale.

(4) Il fattore di conversione η si ottiene come prodotto del fattore di conversione ambientale, η_a , per il fattore di conversione relativo ad effetti di lunga durata, η_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 η_a ed η_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 γ_{Rd} è un coefficiente parziale che tiene conto delle incertezze insite nel suddetto modello; se non espressamente indicato tale coefficiente è assunto pari ad 1. Come argomenti della funzione $R\{\cdot\}$ figurano, 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 γ_m per i materiali

(1) Per gli stati limite ultimi, il valore da attribuire al coefficiente parziale γ_m relativo alle barre di FRP, qui denotato con γ_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 η , 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 η_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 FRP e condizioni di esposizione della struttura armata con barre di FRP, i valori da attribuire al fattore di conversione ambientale η_a .

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

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / matrice*	η_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), è consentito di adottare per il fattore di conversione ambientale il valore $\eta_a = 1$.

4.6.2 Modalità di carico e fattore di conversione per effetti di lunga durata η_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 termoindurenti (esteri vinili, resine epossidiche e fenoliche) sono meno viscosi di quelle termoplastiche (polipropilene, nylon, policarbonati, ecc.), peraltro non contemplate nel presente documento. 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 rilassamento limitato (dell'ordine del 3%), mentre quello esibito dalle fibre aramidiche è più vistoso.

(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 al fenomeno della fatica.

(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 η_I 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 η_I per vari sistemi di FRP.

Modalità di carico	Tipo di fibra / resina	η_I (SLE)	η_I (SLU)
Quasi permanente e/o ciclico (viscosità, rilassamento e fatica)	Vetro / Vinilestere o epossidica	0.30	1.00
	Aramidica / 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 delle sezioni piane 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, ε_{cu} , come definita dalla Normativa vigente;

- raggiungimento di una deformazione ultima nelle barre di FRP, ε_{fd} , calcolata a partire da quella caratteristica a trazione, ε_{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 η_a e γ_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).

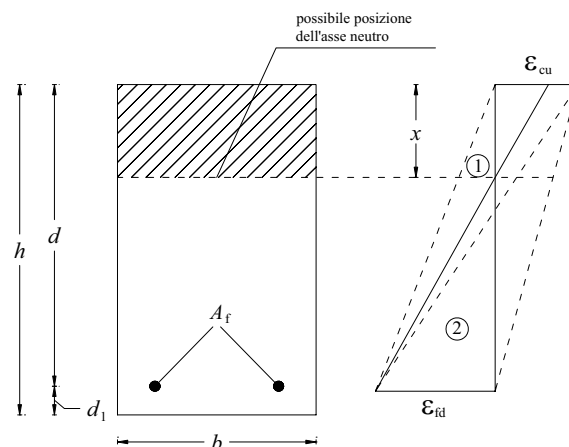


Figura 4-1 – Modalità di rottura di una sezione di calcestruzzo armato con barre di FRP.

(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, ε_{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 ε_{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, ε_{cu} . 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 tensioni in esse mobilitate 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 ad un valore minimo, in grado di garantire 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 tale che il parametro $\rho_1 = A_f / (b \cdot d)$ attinga almeno il valore 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 e omogeneo dei materiali;
- conservazione delle sezioni piane;
- perfetta aderenza tra calcestruzzo e barre di FRP.

(4)P La prima ipotesi consente di assumere un valore costante del modulo di elasticità normale di ciascuno dei materiali costituenti; la seconda comporta 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 denominato 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, sotto la 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 a partire dalla relazione (4.2), assumendo per γ_f il valore unitario e per η uno dei valori 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:

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

Nella (4.8) i simboli utilizzati hanno il seguente significato:

- f_1 è la freccia calcolata nell'ipotesi di sezione interamente reagente;
- f_2 è la freccia calcolata nell'ipotesi di sezione parzializzata;

- β_1 è un coefficiente adimensionale che tiene conto della qualità dell'aderenza delle barre, da assumersi pari a 0.5;
- β_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:

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

Nella (4.9) i simboli utilizzati hanno il seguente significato:

- w_k è l'ampiezza caratteristica delle fessure, espressa in mm;
- β 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_{m} è la distanza media finale tra le fessure, espressa in mm;
- ε_{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:

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

Nella (4.10) i simboli utilizzati hanno il seguente significato:

- 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 equivalente delle barre, espresso in mm; se nella stessa sezione sono impiegati più diametri, può essere adottato il loro valore medio;
- ρ_r è il rapporto di armatura efficace, $A_r / A_{\text{c,eff}}$, dove $A_{\text{c,eff}}$ 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 ε_{fm} può essere ricavato mediante la seguente relazione:

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

Nella (4.11) i simboli utilizzati hanno il seguente significato:

- σ_f è la tensione nell'armatura tesa relativa alla sezione fessurata;
- β_1 e β_2 sono i coefficienti già definiti nel § 4.7.3.3;
- σ_{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 degli usuali meccanismi accessori di resistenza a taglio che si mobilitano nelle travi di conglomerato cementizio armato, $V_{Rd,ct}$, può essere calcolato come:

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

con la limitazione che il prodotto $1.3 \cdot \left(\frac{E_f}{E_s} \right)^{1/2}$ risulti non superiore all'unità.

Nella (4.13) i simboli utilizzati hanno il seguente significato:

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

- τ_{Rd} è la tensione di rottura di calcolo a taglio, 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 $\rho_1 = A_f / (b \cdot d)$ 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 la somma delle aree dei bracci di una singola staffa, s è il passo delle staffe ed f_{fr} la cosiddetta resistenza di progetto ridotta, definita come $f_{fd}/\gamma_{f,\Phi}$.

Al coefficiente parziale $\gamma_{f,\Phi}$, che penalizza ulteriormente il valore della resistenza caratteristica a trazione delle barre per tenere conto degli effetti delle piegature, va attribuito:

- un valore forfettario pari a 2, svincolandosi dall'obbligo di eseguire prove sperimentali specifiche, purché i raggi di curvatura siano maggiori o uguali a sei volte il diametro equivalente della barra, d_b ;
- un valore pari al rapporto tra la resistenza della barra rettilinea e quella della barra piegata in tutti gli altri casi (§ 4.1.1).

4.8.3 Armatura minima

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

$$A_{fw,min} = 0.06 \cdot \sqrt{f_{ck}} \frac{b \cdot s}{0.004 \cdot E_f} \quad [\text{tensioni in N/mm}^2], \quad (4.15)$$

con un limite inferiore pari a $(0.35 \cdot b \cdot s) / 0.004 \cdot E_f$.

4.9 ARMATURA SECONDARIA CON FRP

(1) Quando si esegua il calcolo di solette con modelli tipo trave – senza ricorrere cioè al modello bidimensionale di piastra – è possibile determinare la sola armatura da disporre nella direzione di prevalente inflessione. In aggiunta a quella così calcolata, deve essere prevista un'armatura secondaria di ripartizione, da disporsi ortogonalmente alla prima. L'area specifica dell'armatura secondaria (per unità di lunghezza) non deve risultare 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:

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

con il limite inferiore di 400 mm.

Nella (4.16) i simboli σ_f e d_b sono, rispettivamente, la tensione effettiva mobilitata nella barra in corrispondenza della sezione terminale di ancoraggio e il diametro equivalente della barra stessa. Ai fini della valutazione della tensione σ_f , nelle zone soggette a prevalenti sollecitazioni taglianti, si deve tenere in debito conto l'eventualità di un'opportuna traslazione del diagramma del momento flettente.

(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 è raddoppiata rispetto a 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, percentualmente all'area di calcestruzzo, allo 0.3%, nel caso di barre con fibre di carbonio; all'1.5%, nel caso di barre con fibre di vetro; allo 0.8%, nel caso di barre con fibre di aramide.

(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, preferibilmente, non risulti inferiore a sei volte il diametro della barra.

L'utilizzazione di raggi di curvatura minori è subordinata al soddisfacimento delle seguenti due prescrizioni:

- il produttore deve dimostrare di avere condotto prove sperimentali (ACI 440.3R-04) per determinare il valore della resistenza caratteristica della parte piegata del provino;
- in fase di progetto, il coefficiente parziale $\gamma_{f,\phi}$, da utilizzarsi per il calcolo della resistenza ridotta, deve essere determinato a partire dal valore sopra indicato (§4.8.2.2(2)).

(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 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 appoggio ed in corrispondenza di carichi concentrati, 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;
- dodici volte il diametro minimo delle barre longitudinali;
- 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 minore:

- 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 E DELLE GRIGLIE)

5.1 BARRE DI FRP

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 che termoplastiche, queste ultime escluse dal presente documento.

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 funzione delle caratteristiche dei componenti.

Resine insature poliesteri

Gli elementi di base delle resine insature poliesteri sono costituiti da acidi ortoftalici o isoftalici o da anidridi, in combinazione ad anidride maleica ed a vari glicoli. Le resine poliesteri devono avere la capacità di gelificarsi ed indurirsi velocemente; in generale nel processo di pultrusione vengono adoperate resine di viscosità pari a 1000 mPas. Monomeri aventi maggiore viscosità ed inferiore reattività possono essere mescolati a stirene per facilitare i processi di fabbricazione. La reazione di reticolazione deve essere tale da non lasciare residui di stirene nel prodotto finito.

Le resine poliesteri esibiscono una buona resistenza alla corrosione rispetto agli idrocarburi alifatici, all'acqua e all'ambiente acido. Non presentano invece buona resistenza se esposte ad idrocarburi aromatici, chetoni, acidi concentrati ed alcali. Un elevato grado di insaturazione nelle catene del poliesteri può causare un ritiro volumetrico 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 vinilesteri

Le resine vinilesteri sono caratterizzate da una miglior resistenza alla corrosione ed all'assorbimento igroscopico e da buone proprietà meccaniche ad elevate temperature. Tali resine hanno buone proprietà di resistenza al taglio interlaminare e all'impatto. La struttura chimica delle resine vinilesteri 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 minore densità di reticolazione e la capacità di resistere a temperature più elevate.

Resine epossidiche

Le resine epossidiche sono caratterizzate da una buona resistenza all'assorbimento igroscopico 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. Alcuni tipi di resine termoplastiche possono consentire temperature di esercizio più elevate e sono inoltre caratterizzate da una migliore resistenza nei confronti dell'umidità e dei fattori ambientali. .

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 per lo più sotto forma di barre rettilinee singole o di griglie per la realizzazione di solette, muri e diaframmi. L'utilizzo delle resine termoplastiche sta introducendo nuove possibilità per ovviare ai suddetti inconvenienti ed i primi risultati sono decisamente promettenti rendendo le barre di FRP competitive con quelle metalliche anche sotto tale aspetto.

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

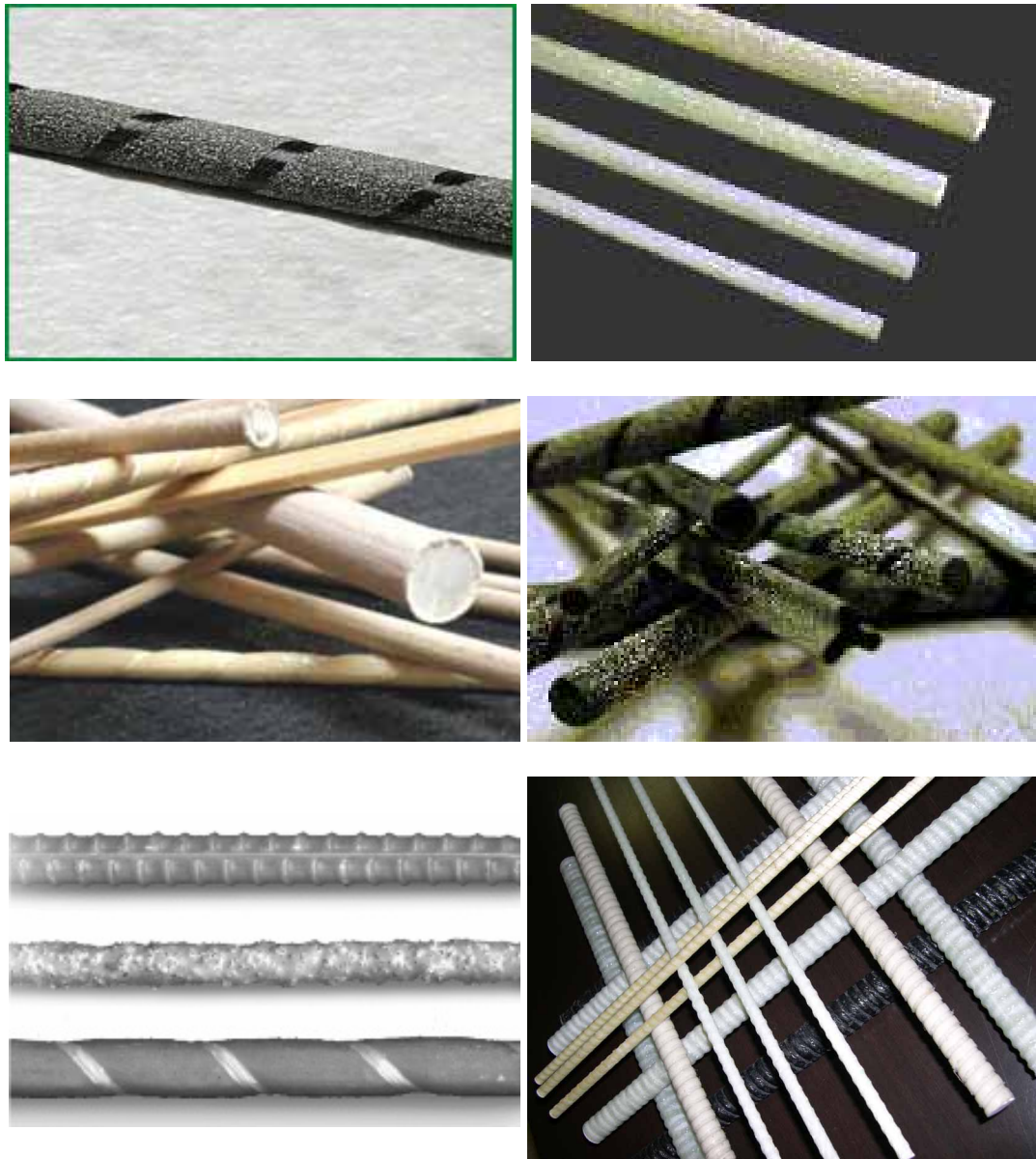


Figura 5-1 – Tipologie di barre di FRP presenti in commercio.

5.2 GRIGLIE DI FRP

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

Esse sono impiegate, generalmente, per il rinforzo interno di elementi di calcestruzzo in sostituzione o in aggiunta alle armature tradizionali d'acciaio, quali barre e/o reti elettrosaldate. A differenza di queste ultime, le griglie presentano l'ulteriore pregio di poter essere posizionate ad una distanza esigua dall'estradosso dell'elemento strutturale, non necessitando dello strato di calcestruzzo protettivo nei confronti della corrosione.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 descritta nelle sue linee essenziali la prova di identificazione delle proprietà meccaniche di trazione di una barra di composito.

Anche per l'esecuzione di questo test sono previste condizioni ambientali standard di laboratorio: temperatura di 23 ± 3 °C e umidità relativa del $50 \pm 10\%$. È inoltre richiesto il confezionamento di almeno cinque provini di FRP, preventivamente condizionati secondo la procedura A relativa allo standard ASTM D 618 (§ 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.

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

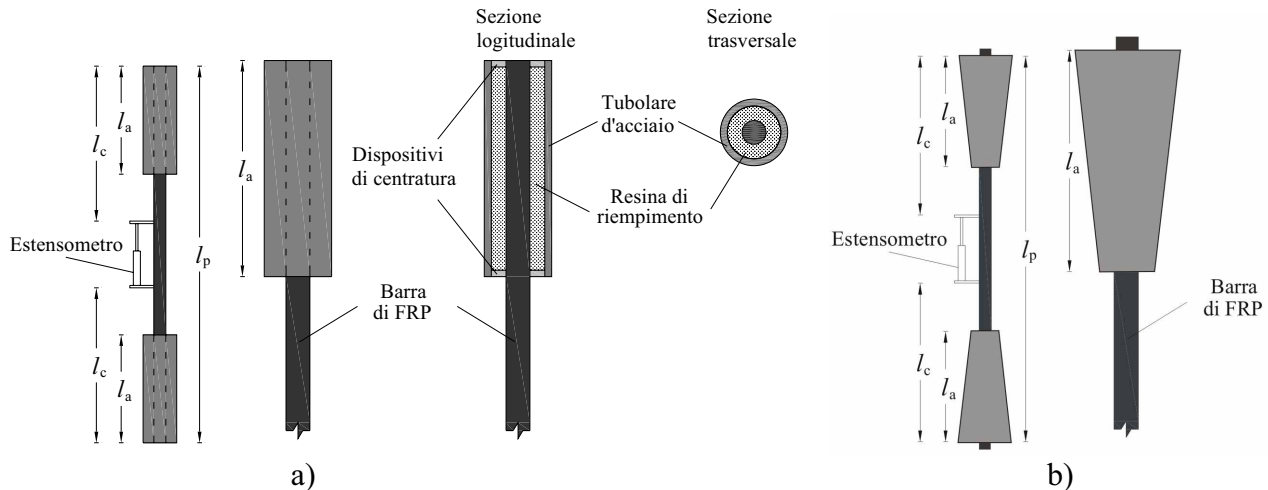


Figura 6-1 – Possibili dispositivi di afferraggio: a) mediante tubolari d'acciaio; b) mediante ringrosso della barra in corrispondenza delle zone terminali.

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

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

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

In quest'ultimo caso è richiesta una precisione non inferiore a 0.02 ‰ della base di misura, la quale non può essere inferiore a otto volte il diametro equivalente della barra ($8 d_b$); 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 ε_1 si sono indicate, rispettivamente, la forza e la deformazione corrispondenti al 50% della tensione di rottura; con F_2 ed ε_2 , rispettivamente, la forza e la deformazione corrispondenti al 20% della tensione di rottura.

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

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

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 equivalente delle barre	mm ²	Appendice B	
perimetro equivalente delle barre	mm	Appendice B	(1)
colore			
densità	fibra	ISO 1183-1:2004(E)	(2)
	matrice		
contenuto di fibra	in peso	ISO 11667:1997(E)	
	in volume		
temperatura di transizione vetrosa della resina (T _g)	°C	ISO 11357-2:1999(E) (DSC) ISO 11359-2:1999(E) (TMA) ASTM 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

8 APPENDICE D

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

Produttori

- La produzione delle barre di FRP, come quella dei singoli componenti (fibre e matrici), deve essere costantemente oggetto di programmi di controllo della qualità.
- 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.

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 cam-

pioni preconditionati 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 tale esponente, 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 ad m il valore sopra ottenuto ed ai coefficienti β_1 e β_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
FEO Prof. Luciano	- Università di Salerno
FICO Ing. Raffaello	- Università "Federico II"- Napoli
FRASSINE Prof. Roberto	- Politecnico di Milano
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
PARRETTI Ing. Renato	- Università "Federico II"- Napoli
PECCE Prof. Maria Rosaria	- Università del Sannio - Benevento
PISANI Prof. Marco Andrea	- Politecnico di Milano
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 dei materiali compositi:

ASCIONE Prof. Luigi.

Segreteria:

FEO Prof. Luciano, ROSATI Prof. Luciano.

Il presente Documento Tecnico è stato approvato in versione preliminare il 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

In data 18/06/2007, il Documento è stato approvato in versione definitiva, con le modificazioni che sono derivate dall’inchiesta pubblica, dalla “Commissione di studio per la predisposizione e l’analisi di norme tecniche relative alle costruzioni” così composta:

ANGOTTI Prof. Franco	- Università di Firenze
ASCIONE Prof. Luigi	- Università di Salerno
BARATTA Prof. Alessandro	- Università “Federico II”- Napoli
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
VINCI Arch. Roberto	- Consiglio Nazionale delle Ricerche
ZANON Prof. Paolo	- Università di Trento