



**Consiglio Nazionale delle Ricerche**

Commissione di Studio per la Predisposizione e l'Analisi di Norme Tecniche relative alle costruzioni

## **CNR-DT 203/R1/2025**

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

**Proprietà letteraria riservata**  
**del**  
**Consiglio Nazionale delle Ricerche**

**INDICE**

<b>1</b>	<b>PREMESSA ALLA PRESENTE REVISIONE (DT 203 R1) DELLE ISTRUZIONI CNR DT 203 .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>2</b>
2.1	CONTENUTI E SCOPO DELLE PRESENTI ISTRUZIONI .....	2
2.2	SIMBOLOGIA .....	4
2.3	ACRONIMI .....	7
<b>3</b>	<b>MATERIALI .....</b>	<b>8</b>
3.1	PREMESSA .....	8
3.2	CARATTERISTICHE RICHIESTE .....	8
3.3	CARATTERISTICHE DELLE BARRE DI FRP .....	9
3.3.1	Proprietà geometriche .....	10
3.3.2	Resistenza e modulo di elasticità a trazione in direzione longitudinale.....	11
3.4	COEFFICIENTI DI DILATAZIONE TERMICA.....	12
3.5	FATICA STATICA .....	13
3.6	RETI DI FRP .....	13
3.7	CONTROLLO PERMANENTE DELLA PRODUZIONE IN STABILIMENTO (FPC) .....	13
3.8	PROCEDURE DI ACCETTAZIONE IN CANTIERE .....	14
<b>4</b>	<b>CONCETTI BASILARI DEL PROGETTO .....</b>	<b>16</b>
4.1	PREMESSA .....	16
4.2	REQUISITI FONDAMENTALI .....	16
4.3	VITA UTILE DELLA STRUTTURA .....	17
4.4	REQUISITI DI DURABILITÀ .....	17
4.5	PRINCIPI GENERALI DEL PROGETTO .....	17
4.5.1	Generalità.....	17
4.5.2	Azioni di calcolo .....	18
4.5.3	Proprietà dei materiali .....	18
4.5.4	Capacità resistente di calcolo.....	18
4.6	FATTORI PARZIALI PER I MATERIALI .....	19
4.7	PROBLEMI SPECIALI DI PROGETTO .....	19
4.7.1	Azioni ambientali e della temperatura .....	19
4.7.2	Fattore di conversione per effetti di lunga durata $\eta_{c,t}$ .....	20
4.7.3	Comportamento delle barre di FRP sotto alte temperature .....	22
<b>5</b>	<b>IL MECCANISMO DI ADERENZA .....</b>	<b>24</b>
5.1	L'ADERENZA DELLE BARRE DI FRP NEL CALCESTRUZZO .....	24
5.2	MODELLAZIONE DEL LEGAME DI ADERENZA .....	25
5.3	CARATTERIZZAZIONE DEL LEGAME DI ADERENZA TRAMITE PROVE SPERIMENTALI.....	27
5.4	LUNGHEZZA DI ANCORAGGIO .....	28
<b>6</b>	<b>COMPORAMENTO AGLI STATI LIMITE ULTIMI .....</b>	<b>30</b>
6.1	VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ RESISTENTE A FLESSIONE E PRESSO- FLESSIONE .....	30
6.1.1	Fondamenti del calcolo .....	30
6.1.2	Momento resistente di progetto .....	30

6.2	PRINCIPI DEL PROGETTO A FLESSIONE SOTTO AZIONI DA INCENDIO .....	33
6.3	VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ RESISTENTE A TAGLIO .....	34
6.3.1	Elementi senza armature trasversali resistenti a taglio.....	34
6.3.2	Elementi con armature trasversali di FRP resistenti a taglio.....	35
6.3.3	Elementi con armatura trasversale a taglio ibrida.....	36
6.3.4	Progetto a taglio sotto azioni da incendio.....	36
6.4	VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ RESISTENTE A TORSIONE .....	37
6.5	CONFINAMENTO.....	37
6.6	CALCOLO DEL MOMENTO RESISTENTE DI PROGETTO ALLO SLU IN PRESENZA DI ARMATURE IBRIDE.....	38
6.6.1	Fondamenti del calcolo .....	38
6.6.2	Valutazione del momento resistente di progetto.....	38
6.7	COMPORAMENTO DELLE STRUTTURE IPERSTATICHE .....	40
6.8	PARTICOLARI COSTRUTTIVI.....	40
6.8.1	Limitazioni sul copriferro.....	40
6.8.2	Limitazioni sulle armature longitudinali .....	41
6.8.3	Limitazioni sulle armature trasversali .....	42
6.8.4	Ulteriori dettagli costruttivi .....	43
<b>7</b>	<b>ANALISI DEL COMPORAMENTO AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO .....</b>	<b>44</b>
7.1	FONDAMENTI DEL CALCOLO.....	44
7.2	STATO LIMITE DI LIMITAZIONE DELLE TENSIONI .....	45
7.3	STATO LIMITE DI DEFORMAZIONE.....	47
7.4	STATO LIMITE DI FESSURAZIONE.....	48
7.5	VERIFICHE ALLO SLE IN PRESENZA DI ARMATURE IBRIDE.....	50
<b>8</b>	<b>PRESCRIZIONI IN ZONA SISMICA.....</b>	<b>52</b>
8.1	PREMESSA.....	52
8.2	STRUTTURE PER LE QUALI IL SISMA PROVOCA RIDOTTE VARIAZIONI DELLE SOLLECITAZIONI RISPETTO A QUELLE VALUTATE PER LE COMBINAZIONI NON SISMICHE.....	52
8.3	STRUTTURE PROGETTATE COME NON DISSIPATIVE .....	53
8.4	STRUTTURE PROGETTATE IN CAMPO DISSIPATIVO .....	54
8.5	STRUTTURE DI FONDAZIONE.....	55
<b>9</b>	<b>PRESCRIZIONI RELATIVE ALL'ESECUZIONE .....</b>	<b>57</b>
9.1	SPEDIZIONE MATERIALE IN CANTIERE .....	57
9.2	STOCCAGGIO IN CANTIERE.....	57
9.3	MANIPOLAZIONE IN CANTIERE.....	57
9.4	POSA IN OPERA .....	58
<b>10</b>	<b>ALTRE APPLICAZIONI .....</b>	<b>59</b>
10.1	PREMESSA.....	59
10.2	BARRE DI FRP COME SISTEMI DI RINFORZO PER STRUTTURE ESISTENTI.....	59
10.2.1	Rinforzo esterno con tecnica NSM.....	59
10.2.2	Ristilatura armata di giunti di malta .....	60
10.2.3	Miglioramento della connessione tra elementi di muratura.....	60
10.3	APPLICAZIONI DI BARRE DI FRP PER IL CONTENIMENTO DEI TERRENI.....	63
10.4	APPLICAZIONI DI BARRE DI FRP PER STRUTTURE TEMPORANEE .....	65
10.5	BARRE DI FRP COME ARMATURA IN ELEMENTI NON STRUTTURALI .....	66
10.6	APPLICAZIONI DI BARRE DI FRP COME ARMATURA DI ELEMENTI ESPOSTI AD INTERFERENZE ELETTROMAGNETICHE .....	66

<b>11 APPENDICE A: Qualificazione e accettazione in cantiere dei materiali e dei prodotti .....</b>	<b>68</b>
11.1 QUALIFICAZIONE DELLE BARRE DI FRP.....	68
11.2 CARATTERISTICHE DELLE BARRE DI FRP.....	69
<b>12 APPENDICE B: Calibrazione dei fattori parziali dei materiali.....</b>	<b>72</b>
12.1 PREMESSA.....	72
12.2 DERIVAZIONE DEL FATTORE PARZIALE DEL MATERIALE $\gamma_m$ .....	72
12.3 DERIVAZIONE DEL FATTORE PARZIALE DELLE INCERTEZZE $\gamma_{Rd}$ .....	73
12.4 DERIVAZIONE DEL FATTORE PARZIALE PER LE BARRE DI FRP $\gamma_f$ .....	74
<b>13 APPENDICE C: Compiti e responsabilità degli operatori nella scelta e nel controllo delle barre di FRP .....</b>	<b>75</b>
<b>14 APPENDICE D: Calibrazione su base sperimentale della formulazione per il calcolo della freccia in elementi inflessi di calcestruzzo armato con barre di FRP.....</b>	<b>77</b>
<b>15 APPENDICE E: Il legame di aderenza barre di FRP-calcestruzzo .....</b>	<b>78</b>
15.1 PREMESSA.....	78
15.2 FORMULAZIONI TEORICHE PER IL LEGAME DI ADERENZA CALCESTRUZZO-BARRE DI FRP.....	79
15.3 VALUTAZIONE DELLA TENSIONE MASSIMA DI ADERENZA .....	81
15.4 LUNGHEZZA DI ANCORAGGIO .....	83
15.5 CALIBRAZIONE SU BASE SPERIMENTALE DELLA LEGGE DI ADERENZA DI BARRE DI FRP .....	88
<b>16 APPENDICE F: Metodo di verifica semplificato in condizioni di incendio.....</b>	<b>92</b>
16.1 GENERALITA' .....	92
16.2 ANALISI TERMICA.....	92
16.3 ANALISI MECCANICA .....	93
<b>17 APPENDICE G: Esempi di calcolo.....</b>	<b>97</b>
17.1 PROGETTO A FLESSIONE DI TRAVI IN C.A. CON BARRE DI FRP.....	97
17.2 VERIFICHE ALLO SLU .....	97
17.3 VERIFICHE ALLO SLE .....	100
17.3.1 Verifiche tensionali.....	100
17.3.2 Controllo dell'ampiezza delle fessure.....	102
17.3.3 Verifica di deformabilità .....	105

# **1 PREMESSA ALLA PRESENTE REVISIONE (DT 203 R1) DELLE ISTRUZIONI CNR DT 203**

Il presente documento fornisce indicazioni progettuali sull'impiego di barre di materiali compositi fibrorinforzati (FRP, *Fibre Reinforced Polymer*) come armatura interna in elementi di calcestruzzo armato ad uso strutturale. L'uso dei materiali compositi fibro-rinforzati in sostituzione dell'acciaio per la realizzazione di elementi strutturali di calcestruzzo è ormai realtà in molti Paesi. Questi materiali consentono, infatti, di coniugare una durabilità delle opere significativamente superiore rispetto ad analoghe strutture con armature tradizionali metalliche con una maggiore sostenibilità nell'approvvigionamento delle materie prime e nella loro lavorazione, un peso decisamente minore che facilita le operazioni di trasporto e messa in opera.

A fronte di questo crescente interesse, negli ultimi anni sono state introdotte diverse normative e linee guida internazionali, ed altre sono state recentemente aggiornate. Un elenco delle linee guida più recenti è riportato al termine di questa Premessa. Anche documenti normativi tipicamente dedicati al calcestruzzo armato con armature metalliche, quali il Model Code e l'Eurocodice 2 (EC2), presentano ora una sezione dedicata all'uso di armature non metalliche.

Il presente documento, in particolare, rappresenta un aggiornamento del documento edito nel 2006 dal CNR che arricchiva la collana dei documenti pubblicati in quegli anni sull'uso strutturale dei materiali FRP, quali il DT 200/2004 (aggiornato nel 2025, versione R2) per il progetto di interventi di rinforzo di strutture di calcestruzzo armato e di strutture murarie con materiali FRP, il DT 201/2005 per il progetto di interventi di rinforzo di strutture lignee con materiali FRP, il DT 202/2005 per il progetto di interventi di rinforzo di strutture metalliche con materiali FRP.

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 a diversi progetti di ricerca sui materiali compositi, finanziati in campo nazionale ed internazionale, cui hanno partecipato a vari livelli ricercatori italiani fin dagli inizi degli anni '2000 e molti dei quali sono presenti nel Gruppo di Lavoro.

## 2 INTRODUZIONE

### 2.1 CONTENUTI E SCOPO DELLE PRESENTI ISTRUZIONI

Le presenti Istruzioni forniscono i principi e le regole per la progettazione di nuove strutture di calcestruzzo armato con barre di FRP (Fiber Reinforced Polymer) o il rinforzo di elementi strutturali esistenti nei quali le barre sono impiegate come armatura lenta in opportuni ringrossi della sezione originaria di calcestruzzo.

Sebbene le ricerche e le prime applicazioni risalgano ad oltre vent'anni fa, si tratta ancora di materiali e di una tecnologia innovativi, per cui in questo documento sono indicati criteri di progetto ed ambiti di applicazione che sono stati ampiamente validati da studi teorici e sperimentali. A questo proposito, sebbene vi siano studi in tal senso, i principi e le regole applicative contenute nel presente Documento non sono direttamente applicabili alle strutture in calcestruzzo armato precompresso con cavi di precompressione realizzati con materiali FRP. Tuttavia, si intende che le barre di FRP possano essere utilizzate, ai fini del presente Documento, anche in elementi strutturali pre-sollecitati, ma unicamente come armatura secondaria (armatura lenta).

Negli ultimi 10-15 anni lo sviluppo tecnologico ha consolidato le tecnologie di pultrusione per la produzione delle barre di FRP. In particolare, le barre in fibra di vetro (GFRP) sono quelle ampiamente più diffuse, sia per numero di produttori, sia per quantità di prodotti qualificati e volumi di materiale prodotto, ma si trovano sul mercato anche barre in fibre di carbonio (CFRP), basalto (BFRP) ed arammide (AFRP).

Nonostante le barre in fibra di carbonio (CFRP) abbiano prestazioni migliori sia in termini di resistenza che di rigidità, a causa dei costi decisamente più elevati, il loro utilizzo è attualmente limitato a specifiche applicazioni, come ad esempio il rinforzo di strutture esistenti in forma di barre a sezione circolare o rettangolare. Si osserva anche che gli studi sperimentali ad oggi disponibili riguardano principalmente le barre di GFRP, pur essendo disponibili già molte prove riferite ad elementi armati con barre in CFRP. Infine, per le barre con fibre di basalto ed arammide non ci sono attualmente prodotti certificati (per cui non è possibile oggi elaborare statistiche sulle proprietà dei materiali) e la sperimentazione è assente o molto ridotta.

Si rileva, inoltre, che, poiché in questo campo la tecnologia è in continua evoluzione grazie allo sviluppo di nuovi materiali e tecniche produttive, ciò pone inevitabilmente problemi alla redazione di Istruzioni per la progettazione come quelle in oggetto. Da un lato limitare le Istruzioni all'uso delle sole barre per le quali la ricerca ha potuto approfondire tutti gli aspetti sperimentali potrebbe costituire un freno allo sviluppo di nuovi materiali e tecnologie. Dall'altro è impossibile, in astratto, prevedere le proprietà di materiali ancora in evoluzione, nonché l'eventuale insorgenza di criticità non riscontrabili per i materiali attualmente più utilizzati.

Casi emblematici, in aggiunta alle tipologie di barre di FRP sopra descritte, sono rappresentati, ad esempio, dalle reti bidirezionali in fibra di vetro oppure da barre di FRP con resine termoplastiche. Queste ultime avrebbero il vantaggio di poter piegare le barre in stabilimento a valle del processo produttivo (operazione sicuramente non possibile per le barre con resine termoindurenti), ma, attualmente, i costi di queste soluzioni non sono confrontabili con quelli delle barre più comuni. Per quanto riguarda le reti di FRP, invece, ad oggi non esistono EAD (*Documento per la Valutazione Europea - European Assessment Document*) di riferimento che ne consentano la qualificazione né esse sono comprese nella *Linea guida per l'identificazione, la qualificazione e l'accettazione di barre e staffe in composito fibrorinforzato per uso strutturale* emesso dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (CSLLPP) nel Dicembre 2021.

Pertanto, alla luce di quanto detto, le presenti Istruzioni forniscono indicazioni progettuali per le sole barre di FRP con sezione circolare realizzate con fibre di vetro e di carbonio che siano marcate CE sulla base di una *Valutazione Tecnica Europea* (ETA, *European Technical Assessment*) redatta

in conformità all'EAD 260023-00-0301 e all'utilizzo in esso dichiarato (barre di FRP come armatura interna di travi, colonne, setti, solette ed eventuali altri elementi strutturali in calcestruzzo o come armatura post-installata per interventi di rinforzo) e relativa alle caratteristiche geometriche e meccaniche ritenute obbligatorie per la progettazione, come specificate in questo documento, oppure un CVT (*Certificato di Valutazione Tecnica*) redatto in conformità con la Linea Guida precedentemente citata.

Le presenti Istruzioni indicano anche i valori minimi richiesti per alcune caratteristiche geometriche e meccaniche ritenute fondamentali per la progettazione. Per quanto detto in precedenza, si ribadisce che le barre di FRP in fibra di basalto e arammide non sono incluse nel campo di applicabilità delle presenti Istruzioni sebbene la loro qualificazione sia prevista per entrambe dall'EAD 260023-00-0301 e solo per le fibre di basalto dalla Linea Guida del CSLLPP, almeno fino a quando non sarà presente in commercio un numero statisticamente significativo di prodotti qualificati e per i quali sia disponibile anche una adeguata sperimentazione relativa ad elementi di calcestruzzo armati con tali tipologie di barre.

Dal punto di vista teorico, la principale differenza rispetto alla tradizionale teoria del calcestruzzo armato con barre di acciaio è relativa al diverso comportamento meccanico degli FRP, caratterizzati da un legame costitutivo essenzialmente elastico lineare fino a rottura, che quindi non presenta risorse apprezzabili di duttilità. Non sono, quindi, applicabili quei metodi dell'analisi strutturale che presuppongono una capacità di redistribuzione plastica nell'elemento. Di conseguenza è richiesta particolare attenzione per le applicazioni in zona sismica, laddove deve essere tenuta in debita considerazione la quasi totale assenza di duttilità nelle strutture realizzate con barre di FRP. A tale scopo, un capitolo specifico delle presenti Istruzioni è dedicato ai criteri di progettazione di elementi in zona sismica, che possono essere differenziati per le varie tipologie strutturali in funzione del fatto che siano o non siano richieste capacità dissipative della struttura. Nel primo caso, le prestazioni in termini di duttilità richiedono necessariamente l'utilizzo di armature 'ibride', armature cioè in cui si prevede l'uso accoppiato di armature di FRP e di acciaio nelle zone critiche dove si possono formare le cerniere plastiche.

Si sottolinea che nel comportamento di elementi di calcestruzzo armato con barre di FRP, possono avere grande importanza anche le verifiche in esercizio, sia in termini di deformazione che di fessurazione. Questo è particolarmente rilevante per le strutture rinforzate con barre in fibra di vetro (GFRP) a causa della maggiore resistenza a trazione, ma di un minore modulo elastico rispetto alle armature metalliche.

Infine, per quanto riguarda l'aderenza barra di FRP – calcestruzzo, le attuali tecniche di preparazione superficiale delle barre consentono di raggiungere in alcuni casi proprietà di aderenza comparabili a quelle delle barre in acciaio per calcestruzzo amato, ma è necessaria un'attenta valutazione della qualità dell'aderenza sulla base delle prove sperimentali di qualificazione previste sia dall'EAD 260023-00-0301 che dalla Linea Guida del CSLLPP precedentemente citata.

Le presenti Istruzioni hanno tenuto in conto, e valutato in modo critico, i criteri e le regole contenuti nei documenti normativi o linee guida presenti nel panorama internazionale, e su alcuni aspetti sono state condotte specifiche ricerche ed approfondimenti che hanno portato a criteri di progetto innovativi, come ad esempio la definizione del fattore parziale per la resistenza delle barre in GFRP, ottenuto sulla base di un esteso database sperimentale, la valutazione della riduzione di resistenza per effetto di carichi di lunga durata (fatica statica), la definizioni di classi di aderenza, i criteri per la valutazione delle prestazioni nei riguardi dell'esercizio, i criteri per la progettazione in zona sismica. Alcuni di questi approfondimenti sono riportati nelle Appendici.

L'approccio seguito nelle Istruzioni è quello del metodo semiprobabilistico agli stati limite, con una impostazione analoga a quella dei documenti normativi di tipo europeo (Eurocodici). Tuttavia, la

maggioranza dei concetti generali può essere applicata, con le debite modifiche, anche ad altri contesti normativi.

L'ultimo capitolo del Documento fornisce, infine, una panoramica su una serie di campi applicativi emergenti, nei quali l'utilizzo di barre di FRP si è rivelato particolarmente promettente. Oltre alle ben note proprietà di durabilità, caratteristiche come, ad esempio, la leggerezza possono aprire interessanti prospettive di utilizzo di tali barre, ad esempio realizzazione di opere a carattere provvisorio, di rivestimenti di gallerie, di paratie prospicienti zone marine, e di opere provvisorie negli scavi, utilizzo come armatura di pavimentazioni e come tiranti per il contenimento di terreni. Di grande interesse anche l'utilizzo per il rinforzo di strutture esistenti con la tecnica NSM (*Near Surface Mounted*), sia in muratura in zona sismica che in calcestruzzo armato degradato (ad esempio nelle infrastrutture). In quest'ultimo caso, l'uso combinato con calcestruzzi o malte ad alte prestazioni potrebbe consentire di ridurre al minimo lo spessore del ricoprimento, con evidenti vantaggi in termini di minore impatto delle lavorazioni richieste e contenimento dell'aumento di peso. Infine, si segnala anche l'utilizzo di barre di FRP per il miglioramento delle connessioni in elementi di muratura. Si precisa tuttavia che, anche per queste applicazioni, il Documento non fornisce specifiche indicazioni progettuali.

Le Istruzioni e/o Linee Guida attualmente disponibili nel panorama internazionale sono:

- *fib* Model Code 2020
- Annex R, Eurocode 2 (2023)
- AFGC 2023, Recommendations for the use of FRP (Fibre Reinforced Polymer) rebars for reinforced concrete structures, Association Francaise de Genie Civil
- *fib bulletin n.40*, 2007, “FRP Reinforcement for RC Structures”, Task Group 9.3 (*Fibre Reinforced Polymer*) Reinforcement for Concrete Structures, Lausanne, Switzerland;
- ACI 440.1R, 2015, “Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars”, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI, USA.
- CAN/CSA S806-2017, Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers.
- ACI CODE-440.11-22: Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars—Code and Commentary.
- CAN/CSA-S6-19, 2019, “Canadian High Bridge Design Code,” Canadian Standard Association (CSA) International, Toronto, Ontario, Canada.
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 2023, “Recommendation for Design and construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials”.

## 2.2 SIMBOLOGIA

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

### Lettere romane maiuscole

$A_b$	area nominale della barra di FRP
$A_{b,eff}$	area effettiva della barra di FRP
$A_{b,min}$	area minima della barra di FRP ammessa rispetto all'area nominale
$A_{b,max}$	area massima della barra di FRP ammessa rispetto all'area nominale
$A_c$	area della sezione di calcestruzzo, al netto delle barre
$A_{c,ef}$	area di calcestruzzo efficace in trazione
$A_f$	area delle barre di FRP in trazione (armatura longitudinale)
$A_{fw}$	area delle barre di FRP come armatura trasversale
$B_s$	larghezza del braccio della staffa di FRP

$E_c$	modulo di elasticità normale istantaneo del calcestruzzo
$E_{c,eff}$	modulo elastico efficace del calcestruzzo
$E_{c,FRP}$	modulo di elasticità normale a compressione della barra di FRP
$E_f$	modulo di elasticità longitudinale a trazione della barra di FRP
$E_s$	modulo di elasticità longitudinale a trazione dell'acciaio
$I_1$	momento di inerzia della sezione in c.a. armata con barre di FRP in condizione non fessurata
$I_2$	momento di inerzia della sezione in c.a. armata con barre di FRP in condizione fessurata
$L_t$	lunghezza della staffa di FRP al di là della sagomatura
$M_{max}$	momento agente nella sezione più sollecitata dell'elemento
$M_{cr}$	momento di prima fessurazione della sezione in c.a. con barre di FRP
$M_{Rd}$	momento resistente di progetto
$M_{Sd}$	momento flettente sollecitante di progetto
$P_{fib}$	frazione in peso delle fibre
$R_{et,t}^{1000}$	percentuale residua della resistenza media a trazione della barra di FRP in ambiente alcalino dopo 1000 ore di esposizione e con carico sostenuto
$R_{et,t}^{3000}$	percentuale residua della resistenza media a trazione della barra di FRP in ambiente alcalino dopo 3000 ore di esposizione
$T_{pm}$	temperatura di fusione
$T_g$	temperatura di transizione vetrosa della barra
$T_{max}$	temperatura massima di esercizio della barra di FRP
$V_{fib}$	frazione volumetrica delle fibre
$V_{Rd}$	resistenza di progetto a taglio dell'elemento in calcestruzzo armato
$V_{Rd,ct}, V_{Rd,ct,min}$	resistenza di progetto a taglio relativo ai meccanismi del calcestruzzo
$V_{Rd,f}$	contributo delle armature trasversali di FRP alla resistenza di progetto a taglio
$V_{Rd,c}$	resistenza di progetto a taglio della biella compressa di calcestruzzo
$V_{Sd}$	taglio sollecitante di progetto
$Y_t$	tasso di rilassamento a tempo t, con t = 10, 120 o 1000 ore
$Y_{million}$	tasso di rilassamento ad 1 milione di ore

### Lettere romane minuscole

$b$	base della sezione
$b_w$	base minima della sezione (ai fini del calcolo della resistenza a taglio)
$c$	distanza del baricentro delle barre di FRP dal lembo teso della sezione (copriferro meccanico)
$c_{geom}$	distanza del bordo inferiore delle barre di FRP dal lembo teso della sezione (copriferro geometrico)
$d$	distanza del baricentro delle barre di FRP dal lembo compresso della sezione (altezza utile)
$d_s$	distanza del baricentro delle barre di acciaio dal lembo compresso della sezione
$d_b$	diametro nominale della barra di FRP
$d_{eff}$	diametro effettivo della barra di FRP
$d_{bs}$	diametro nominale della staffa di FRP
$f$	freccia dell'elemento strutturale
$f_1$	freccia calcolata nell'ipotesi di sezione non fessurata
$f_2$	freccia calcolata nell'ipotesi di sezione fessurata
$f_{cm}$	resistenza a compressione cilindrica media del calcestruzzo
$f_{cd}$	resistenza a compressione cilindrica di progetto del calcestruzzo
$f_{ck}$	resistenza a compressione cilindrica caratteristica del calcestruzzo
$f_{ctd}$	resistenza a trazione di progetto del calcestruzzo

$f_{ctm}$	resistenza a trazione media del calcestruzzo
$f_{fatigue}$	resistenza a fatica a trazione della barra di FRP
$f_{fd}$	resistenza a trazione di progetto della barra di FRP
$f_{fk0}$	resistenza a trazione caratteristica della barra di FRP
$f_{fk,c}$	resistenza a trazione caratteristica della barra di FRP per fatica statica (creep) a 100 anni
$f_{fk,ca}$	resistenza a trazione caratteristica della barra di FRP per fatica statica a 100 anni che tiene conto di effetti ambientali (ambiente alcalino e temperatura)
$f_{fk,st}$	resistenza a trazione caratteristica della parte dritta del braccio della staffa di FRP
$f_{ubk}$	resistenza a trazione caratteristica della parte piegata della staffa di FRP
$f_{yd}$	tensione di snervamento di progetto delle barre di acciaio
$f_{c,FRP}$	resistenza a compressione della barra di FRP
$h$	altezza della sezione
$h_{c,ef}$	altezza di calcestruzzo efficace in trazione
$l_{ad}$	lunghezza di ancoraggio delle barre di FRP
$l_{ad}$	lunghezza di ancoraggio di progetto delle barre di FRP
$l_b$	lunghezza ancorata delle barre di FRP
$s$	passo delle staffe di FRP
$s_{r,max}$	distanza massima tra le fessure
$x$	distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta allo SLU
$x_2$	distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione in condizione fessurata per verifiche agli SLE
$r_t$	raggio di curvatura della barra piegata o della staffa di FRP
$w_k$	valore caratteristico dell'apertura delle fessure

### Lettere greche minuscole

$\alpha_f$	coefficiente di omogeneizzazione barre di FRP-calcestruzzo
$\alpha_s$	coefficiente di omogeneizzazione barre di acciaio-calcestruzzo
$\alpha_R$	fattore di sensibilità secondo il First Order Reliability Method (FORM)
$\alpha_{sp,L}$	Coefficiente di dilatazione termica longitudinale
$\alpha_{sp,T}$	Coefficiente di dilatazione termica trasversale
$\beta$	valore obiettivo dell'indice di affidabilità, funzione della classe di conseguenza della struttura e del periodo di ritorno (EN 1990)
$\gamma$	coefficiente di tension – stiffening
$\gamma_c$	fattore parziale del calcestruzzo
$\gamma_f$	fattore parziale delle barre di FRP
$\gamma_m$	fattore parziale del materiale
$\gamma_{Rd}$	fattore parziale per il modello di resistenza
$\gamma_{Rd,geo}$	fattore parziale che tiene conto delle deviazioni geometriche
$\gamma_{Rd,mod}$	fattore parziale che tiene conto dell'incertezza sul modello di resistenza
$\varphi(t, t_0)$	coefficiente di viscosità del calcestruzzo
$\epsilon_c$	deformazione del calcestruzzo al lembo compresso
$\epsilon_{cu}$	deformazione ultima del calcestruzzo
$\epsilon_f$	deformazione corrente nelle barre tese di FRP
$\epsilon_{fd}$	deformazione di progetto a trazione della barra di FRP
$\epsilon_{fk}$	deformazione caratteristica a rottura per trazione della barra di FRP
$\epsilon_s$	deformazione corrente nelle barre tese di acciaio
$\epsilon_{yd}$	deformazione di snervamento delle barre di acciaio
$\epsilon_{fm}$	valore medio delle deformazioni nelle barre di FRP tra due fessure successive

---

$\varepsilon_{cm}$	valore medio delle deformazioni nel calcestruzzo teso tra due fessure successive
$\eta_a$	fattore di conversione ambientale
$\eta_T$	fattore di conversione per effetti della temperatura
$\eta_{c,l}$	fattore di conversione per effetti di fatica statica per carichi di lunga durata
$\eta_c$	fattore di conversione per effetti di fatica statica a 100 anni
$\eta_{ca}$	fattore di conversione per fatica statica a 100 anni che tiene conto di effetti ambientali (ambiente alcalino e temperatura)
$\rho_l$	percentuale di armatura tesa longitudinale rispetto alla sezione in calcestruzzo
$\rho_f$	percentuale di rinforzo rispetto all'area di calcestruzzo
$\rho_{f,ef}$	percentuale efficace di rinforzo rispetto all'area di calcestruzzo teso efficace
$\sigma_c$	tensione normale di compressione nel calcestruzzo
$\sigma_f$	tensione normale corrente nelle barre di FRP tese
$\sigma_{f,qp}$	tensione normale di trazione nelle barre di FRP per effetto del carico persistente
$\sigma_s$	tensione normale corrente nelle barre di acciaio tese
$\tau_b$	tensione di aderenza massima all'interfaccia calcestruzzo-barra FRP
$\tau_{b,a}$	tensione di aderenza in condizioni alcaline
$\tau_{b,C50/60}$	tensione di aderenza in calcestruzzo ad alta resistenza
$\tau_{b,cb}$	tensione di aderenza della barra in posizione eccentrica con copriferro $c_b$
$\tau_{bm}$	valore medio della tensione di aderenza massima
$\tau_{b,Tmax}$	tensione di aderenza alla massima temperatura di esercizio
$\tau_i$	resistenza a taglio interlaminare della barra di FRP
$\tau_s$	resistenza a taglio trasversale della barra di FRP

### 2.3 ACRONIMI

CPR	Regolamento sui prodotti da costruzione ( <i>Construction Product Regulation</i> )
CVT	Certificato di Valutazione Tecnica
DoP	Dichiarazione di Prestazione ( <i>Declaration of Performance</i> )
DoPC	Dichiarazione di Prestazione e Conformità ( <i>Declaration of Performance and Conformity</i> )
CCPC	Certificato di Costanza della Prestazione e di Conformità del prodotto
EAD	Documento per la Valutazione Europea ( <i>European Assessment Document</i> )
ETA	Valutazione Tecnica Europea ( <i>European Technical Assessment</i> )
FPC	Controllo della produzione in fabbrica ( <i>Factory Production Control</i> )
FRP	Fiber Reinforced Polymer
NSM	Near Surface Mounted bars
SLU	Stato Limite Ultimo
SLE	Stato Limite di Esercizio
c.a.	calcestruzzo armato

## 3 MATERIALI

### 3.1 PREMESSA

(1) Rientrano nel campo di applicazione delle presenti Istruzioni le barre rettilinee, le barre sagomate a forma di staffe e le barre che presentano ad un'estremità una piegatura a 90°, che abbiano una frazione in peso di fibre non inferiore al 70% o una frazione volumetrica non inferiore al 50%, costituite da fibre continue di vetro o carbonio, realizzate con resine termoindurenti o termoplastiche purché abbiano alcune caratteristiche obbligatorie qualificate e superiori a valori di soglia secondo quanto riportato nel presente capitolo, anche con riferimento alla durabilità. Per quanto siano presenti in commercio barre di FRP realizzate con fibre continue di basalto o di arammide, i dati sperimentali disponibili non sono ad oggi sufficienti per consentirne l'utilizzo ai fini del presente Documento.

(2) Le barre di FRP in fibra di carbonio e di vetro a sezione non circolare e le reti preformate con barre di FRP non rientrano nel campo di applicazione delle presenti Istruzioni.

(3) Tutti i prodotti devono essere qualificati mediante marcatura CE redatta sulla scorta di una Valutazione Tecnica Europea (ETA, *Evaluation Technical Assessment*) secondo l'uso previsto nell'EAD 260023-00-0301 e successive revisioni (barre di FRP come armatura interna di travi, colonne, setti, solette ed eventuali altri elementi strutturali in calcestruzzo o come armatura post-installata per interventi di rinforzo), in seguito indicato per brevità come 'EAD-barre FRP', o mediante Certificati di Valutazione Tecnica (CVT) redatti in conformità con la *Linea guida per l'identificazione, la qualificazione e l'accettazione di barre e staffe in composito fibrorinforzato per uso strutturale* emanata dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (CSLLPP) nel Dicembre 2021 e successivi aggiornamenti, in seguito indicata per brevità come 'LG-barre FRP'.

### 3.2 CARATTERISTICHE RICHIESTE

(1) Per utilizzi di tipo strutturale, la Normativa italiana vigente impone obbligatoriamente l'utilizzo di materiali che siano stati adeguatamente qualificati. Ai fini dell'applicazione del presente Documento, è necessario che le barre di cui al 3.1 siano qualificate mediante marcatura CE o mediante Certificati di Valutazione Tecnica (CVT). I prodotti con marcatura CE si intendono qualificati ai fini del presente documento se accompagnati da DoPC (che nel futuro sostituirà la DoP) dichiarante le prestazioni relative alle caratteristiche riportate nella Tabella 3-1.

(2) I valori minimi delle caratteristiche geometriche e meccaniche di cui, ai fini del presente documento, è obbligatoria la determinazione (di seguito indicate come 'caratteristiche obbligatorie') sono riportati in Appendice A.

**Tabella 3-1** – Caratteristiche obbligatorie delle barre di FRP

<b>Caratteristica obbligatoria</b>	<b>Simbolo</b>
Diametro effettivo della barra [mm]	$d_{eff}$
Area effettiva della barra [mm <sup>2</sup> ]	$A_{eff}$
Frazione volumetrica delle fibre [%] o Frazione in peso delle fibre [%] (*)	$V_{fib}$ [%] $P_{fib}$ [%]
Resistenza a trazione (valore caratteristico) [MPa]	$f_{tk0}$
Modulo elastico longitudinale a trazione (valore medio) [GPa]	$E_f$
Temperatura di transizione vetrosa [°C]	$T_g$
Massima temperatura di servizio [°C]	$T_{max}$
Resistenza a taglio trasversale [MPa]	$\tau_s$
Resistenza a taglio interlaminare [MPa]	$\tau_i$
Resistenza all'estrazione ( <i>pull-out</i> ) della barra di FRP da supporto in calcestruzzo C20/25 in posizione centrata (valore medio) [MPa]	$\tau_{bm}$
Percentuale residua della resistenza a trazione media della barra per esposizione in ambiente alcalino (esposizione per 3000 ore a 60 °C) [%]	$R_{et,t}^{3000}$
<i>Per barre di FRP sagomate (staffe o barre piegate)</i>	
Resistenza della parte dritta (valore caratteristico) [MPa] (*)	$f_{tk,st}$
Resistenza a trazione della parte piegata (valore caratteristico) [MPa]	$f_{ubk}$
Raggio di curvatura della sagomatura [mm]	$r_t$

(\*) Tale caratteristica non è dichiarata in DoPC, ma sarà cura del Fabbrikante riportarne il valore in una dichiarazione da lui sottoscritta.

(3) Le modalità e le procedure standardizzate da seguire per la qualificazione delle barre di FRP finalizzate alla determinazione delle proprietà geometriche e meccaniche delle barre di FRP di cui sopra sono riportate nell'Appendice A.

(4) Le sezioni trasversali delle barre diritte e piegate possono essere pressoché circolari o di forma rettangolare. Tuttavia, le regole di dettaglio e per la realizzazione dei particolari costruttivi contenute in queste Istruzioni sono valide solo per le prime.

(5) Le proprietà di aderenza delle barre di FRP con il calcestruzzo dipendono dal processo di produzione e dalle caratteristiche del trattamento utilizzato per la loro superficie. In base ai risultati delle prove di aderenza e, in particolare, del valore della caratteristica essenziale,  $\tau_{bm}$ , è possibile definire per una specifica tipologia di barra di FRP la qualità dell'aderenza secondo quanto riportato nel 5.3.

### 3.3 CARATTERISTICHE DELLE BARRE DI FRP

(1) Le proprietà meccaniche dei materiali compositi FRP dipendono principalmente dal tipo di resina e dalla natura delle fibre, nonché dalla frazione volumetrica o in peso di queste ultime.

(2) Tutte le proprietà meccaniche, ed in particolare i valori di resistenza e di modulo di elasticità, devono riferirsi all'area effettiva della barra.

(3) Le barre di FRP devono essere unicamente individuate in funzione della classe, definita dal tipo di fibra, dal modulo elastico e dalla resistenza a trazione a rottura, valutati rispetto all'area effettiva, e della dimensione, definita dal diametro nominale. La tolleranza dimensionale delle barre è valutata in termini di area della sezione trasversale ed è indicata nel Paragrafo 3.3.1. Nei calcoli dovranno essere utilizzati i valori di resistenza e modulo elastico corrispondenti alla classe e l'area nominale della barra.

(4) Per le barre di FRP sagomate in forma di staffe o le barre di FRP che presentano una piegatura a 90° ad un'estremità che siano ottenute con la stessa procedura di produzione delle barre dritte di

uguale diametro nominale, la classificazione può riferirsi a queste ultime, purchè si valutino anche le caratteristiche relative alla parte piegata. Qualora le barre sagomate siano ottenute da un processo produttivo diverso da quello seguito per ottenere le barre dritte di uguale diametro nominale, esse devono considerarsi come un prodotto diverso che richiede, pertanto, un proprio processo di qualificazione e la determinazione delle caratteristiche riportate in Tabella 3-1 si intendono riferite alle proprietà meccaniche valutate sulla parte dritta dell'elemento. Nel caso di barre con resine termoplastiche, la piegatura delle barre dopo il processo di produzione non può essere realizzata in cantiere, ma deve essere realizzata a caldo nello stabilimento di produzione in condizioni controllate.

### 3.3.1 Proprietà geometriche

(1) Le procedure per la valutazione del diametro e dell'area effettiva delle barre di FRP sono riportate nel 'EAD-barre FRP' e nella 'LG-barre FRP'. In base a tali documenti, il diametro nominale delle sezioni circolari può variare nell'intervallo tra 5 mm e 32 mm, compresi gli estremi dell'intervallo. Maggiori dettagli sono riportati nell'Appendice A.

(2) In considerazione della notevole varietà delle barre in commercio, in fase di progetto, per il calcolo dell'area resistente occorre riferirsi al diametro nominale,  $d_b$ , delle barre di FRP a sezione circolare. E' possibile associare un dato diametro nominale e la corrispondente area nominale,  $A_b$ , ad una barra di FRP se la sua area effettiva  $A_{eff}$  ricade negli intervalli riportati in Tabella 3-2 ( $A_{min} \leq A_{eff} < A_{max}$ ), essendo l'area effettiva misurata secondo le metodologie indicate nei documenti di qualificazione attualmente vigenti. Le tolleranze riportate in Tabella 3-2 sono state fissate sulla base di un'analisi statistica delle aree effettive misurate in un esteso campione di barre in fibra di vetro presenti in commercio. Per le barre in fibre di carbonio, in assenza di un analogo campione statistico, si assumono le stesse tolleranze.

**Tabella 3-2** Tolleranze minime e massime ammissibili in termini di area della sezione trasversale per barre con diametri nominali variabili da 5 a 32 mm

Diametro nominale $d_b$ [mm]	Area nominale $A_b$ [mm <sup>2</sup> ]	Area minima $A_{min}$ [mm <sup>2</sup> ]	Area massima $A_{max}$ [mm <sup>2</sup> ]
5	19.6	18	26
6	28.3	26	35
7	38.5	35	47
8	50.2	47	59
9	63.6	59	73
10	78.5	73	89
11	95.0	89	103
12	113.0	103	123
13	132.7	123	144
14	153.9	144	165
15	176.6	165	190
16	201.0	190	212
17	226.9	212	239
18	254.3	239	265
19	283.4	265	293
20	314.0	293	324
21	346.2	324	357
22	379.9	357	392
23	415.3	392	429
24	452.2	429	467
25	490.6	467	506
26	530.7	506	547
27	572.3	547	590
28	615.4	590	635
29	660.2	635	681
30	706.5	681	729
31	754.4	729	778
32	803.8	778	861

(4) Il Fabbricante, decisa la scansione di diametri che intende proporre sul mercato, potrà raggruppare 2 o 3 di questi intervalli e considerare come tolleranza l'unione degli intervalli indicati, assumendo, in tal caso, come diametro nominale quello corrispondente al valore più piccolo. Nella scheda tecnica, il produttore dovrà comunque riportare anche il diametro medio effettivo, al fine di consentire una valutazione accurata dell'area di armatura nei casi in cui sia necessario, come, ad esempio, nel caso dell'applicazione dei criteri di gerarchia delle resistenze nella progettazione per azioni sismiche.

### 3.3.2 Resistenza e modulo di elasticità a trazione in direzione longitudinale

(1) Al fine di valutare in modo affidabile le proprietà meccaniche di una barra di FRP è necessario condurre una adeguata sperimentazione, in modo da ottenere valori statisticamente significativi, che tengano conto anche della costanza delle proprietà meccaniche assicurata dalla tecnologia di produzione. Per le modalità di prova ed il controllo della costanza della produzione occorre far riferimento alle procedure indicate nell'EAD-barre FRP o nelle LG-barre FRP. In particolare, la resi-

stenza e il modulo di elasticità a trazione delle barre devono essere ottenute da prove di trazione diretta. Maggiori dettagli sono riportati nell'Appendice A.

(2) Le barre di FRP che possono essere utilizzate in accordo alle presenti Istruzioni sono classificate in base ai valori delle seguenti caratteristiche meccaniche:

- valore medio del modulo elastico,  $E_f$ ;
- valore caratteristico della tensione di rottura a trazione,  $f_{tk0}$ , valutata in condizioni ambientali standard.

Tali caratteristiche devono essere valutate dal Fabbricante sulla scorta dei risultati delle procedure di qualificazione di cui al § 3.2 ed essere riferite all'area effettiva della sezione trasversale della barra.

(3) La Tabella 3-3 riporta le classi delle barre di FRP e i corrispondenti valori delle suddette caratteristiche meccaniche. L'appartenenza ad una classe richiede che i valori del modulo elastico medio e della resistenza caratteristica a trazione delle barre determinati siano maggiori o uguali a quelli indicati nella Tabella 3-3.

(4) Per uno specifico prodotto, tutte le barre di FRP, con diametri nominali diversi, devono ricadere nella stessa classe. Nel caso di diametri di barra che, nella fase di qualificazione, presentino valori del modulo elastico e della resistenza a trazione ricadenti in classi differenti, la classificazione va fatta con riferimento alla classe con caratteristiche inferiori.

(5) Qualora una barra di FRP presenti caratteristiche meccaniche inferiori a quelle della classe minima indicata in Tabella 3-3, non può essere utilizzata in accordo alle presenti Istruzioni.

**Tabella 3-3 – Classi delle barre di FRP**

<b>Classe</b> $E_f/f_{tk0}$	<b>Tipo di fibra</b>	<b>Modulo elastico medio a trazione, <math>E_f</math></b> [GPa]	<b>Resistenza caratteristica a trazione, <math>f_{tk}</math></b> [MPa]
E45/850	Vetro	45	850 750 per diametri $d_b \geq 24$ mm
E50/1000	Vetro	50	1000 900 per diametri $d_b \geq 24$ mm
E60/1100	Vetro	60	1100 1000 per diametri $d_b \geq 24$ mm
C130/1000	Carbonio	130	1000

### 3.4 COEFFICIENTI DI DILATAZIONE TERMICA

(1) I coefficienti di dilatazione termica delle barre di FRP in direzione longitudinale,  $\alpha_l$ , e trasversale,  $\alpha_t$ , sono strettamente correlati a quelli delle singole fasi (matrice e fibre) che costituiscono il materiale composito ed alle frazioni volumetrica delle due fasi: in generale, il valore in direzione trasversale è governato dalla resina che funge da matrice, mentre quello in direzione longitudinale dalle fibre. Al crescere della frazione volumetrica delle fibre, il valore del coefficiente  $\alpha_l$  tende sempre di più a quello delle fibre.

(2) Valori tipici dei coefficienti di dilatazione termica longitudinale e trasversale, rispettivamente  $\alpha_l$  e  $\alpha_t$ , sono riportati in Tabella 3-4, relativamente a barre di composito con una frazione volumetrica di fibre compresa tra il 50% ed il 70%. E' consigliato utilizzare barre che abbiano un coefficiente di dilatazione termica trasversale  $\alpha_t < 40.0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Differenti coefficienti di dilatazione termica trasversale delle barre di FRP e del calcestruzzo possono infatti determinare l'insorgere di fessure da splitting nel calcestruzzo al crescere della temperatura, se non è previsto un idoneo ricoprimento di calcestruzzo che svolga un'adeguata azione di confinamento.

**Tabella 3-4** – Coefficienti di dilatazione termica.

Barra	$\alpha_t$ [10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> ]	$\alpha_t$ [10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> ]
Carbonio	-9.0 ÷ 0.0	74.0 ÷ 104.0
Vetro	6.0 ÷ 10.0	21.0 ÷ 23.0

### 3.5 FATICA STATICA

(1) 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 nel tempo 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 e umidità.

(2) Per mitigare gli effetti della viscosità ed evitare la rottura delle barre per fatica statica, i valori delle tensioni conseguenti a carichi di lunga durata devono essere opportunamente limitati. Prescrizioni in tal senso riguardano sia le verifiche nei riguardi degli stati limite ultimi che di esercizio (§ 4.7.2).

### 3.6 RETI DI FRP

(1) Rientrano nel campo di applicazione delle presenti Istruzioni, le reti di FRP realizzate come assemblaggi di barre di FRP a sezione circolare in fibre di carbonio o vetro nelle due direzioni purchè l’assemblaggio non alteri alcuna delle proprietà geometriche e meccaniche delle singole barre che devono essere qualificate secondo le procedure indicate nei vigenti documenti di qualificazione (EAD-barra FRP e LG-barre FRP).

(2) Le presenti Istruzioni attualmente non contemplano l’utilizzo di altre tipologie di reti di FRP. In presenza di procedure di qualificazione standardizzate e di adeguata sperimentazione sarà possibile estendere il campo di applicazione anche ad altre tipologie di reti previo aggiornamento delle presenti Istruzioni ed eventualmente facendo ricorso al ‘*Design by Testing*’ per la definizione di specifici modelli di capacità.

### 3.7 CONTROLLO PERMANENTE DELLA PRODUZIONE IN STABILIMENTO (FPC)

(1) Le barre di FRP, da utilizzarsi come armatura di strutture in calcestruzzo, devono essere soggette ad una serie di controlli che assicurino un livello adeguato di costanza 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;
- il Fabbricante di barre deve utilizzare elementi base (fibre e resine) certificati dai relativi fornitori e quindi anch’essi soggetti a controlli periodici della produzione.

(2) Per le barre certificate mediante CVT, 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 in cui il Fabbricante 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 mediante analisi statistica delle misure e dei risultati delle prove. 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.

Indicazioni più precise sulle prove da effettuarsi per il controllo della produzione in fabbrica sono riportate nelle LG-barre FRP.

(3) Per le barre qualificate mediante marcatura CE, il controllo della produzione in fabbrica è regolamentato dal paragrafo 3.1 dell'EAD-barre FRP.

### 3.8 PROCEDURE DI ACCETTAZIONE IN CANTIERE

(1) Le procedure per l'accettazione in cantiere sono riportate in dettaglio nelle Linee Guida di qualificazione vigenti. Nel caso di prodotti qualificati mediante CVT, i controlli di accettazione in cantiere sulle barre:

- sono obbligatori e di competenza del Direttore dei Lavori;
- devono essere effettuati nell'ambito di ciascun lotto di spedizione, quando il numero di lotto di produzione differisce fra i vari lotti di spedizione, e devono riguardare tutti i tipi di prodotti oggetto di fornitura; qualora il lotto di produzione sia lo stesso per tutti i lotti di spedizione, sarà a discrezione della Direttore dei Lavori effettuare uno o più prelievi;
- devono essere prelevati in cantiere, da uno o più prodotti (barre rettilinee, staffe, barre piegate di FRP), n. 3 campioni in riferimento ad ogni lotto di spedizione, se il marchio e la documentazione di accompagnamento ne dimostrino la provenienza da uno stesso stabilimento. In caso contrario, i controlli devono essere estesi ai lotti provenienti da altri stabilimenti.

(2) Per i prodotti qualificati mediante CVT, sui campioni prelevati secondo le modalità e nel numero indicati nelle LG-barre FRP, devono essere eseguite le prove di tipo geometrico e meccanico riportate in Tabella 3-5.

**Tabella 3-5** – Caratteristiche geometriche e meccaniche da controllare nei campioni prelevati in cantiere secondo LG-barre FRP, e limiti di accettabilità

	<b>Caratteristica</b>	<b>Simbolo</b>	<b>Limite di accettabilità</b>
Prove di tipo geometrico	- Area effettiva della barra	$A_{eff}$ [mm <sup>2</sup> ]	Compresa entro le tolleranze riportate in Tabella 3-1 rispetto al valore nominale dichiarato dal Fabbrikante per quel diametro
	- Raggio di sagomatura delle staffe	$r_t$ [mm]	*
Prove di tipo meccanico	Resistenza a trazione caratteristica	$f_{tk0}$ [MPa]	≥ 95% del valore caratteristico certificato**
	Modulo elastico longitudinale medio	$E_f$ [GPa]	≥ 95% del valore medio certificato***
	Deformazione a rottura caratteristica	$\varepsilon_{tk0}$ [mm/mm]	≥ 95% del valore caratteristico certificato**
	Resistenza a trazione caratteristica della parte dritta della staffa	$f_{tk,st}$ [MPa]	≥ 95% del valore caratteristico certificato*

\* Il diametro minimo del mandrino per realizzare la piegatura ( $2r_t$ ) deve essere pari almeno a 7 volte il diametro nominale della barra,  $d_b$ , per diametri maggiori di 16 mm, e pari almeno a 4 volte  $d_b$ , per diametri minori di 16 mm.

\*\* La disuguaglianza deve essere rispettata sia per il risultato di ciascun provino sia per il valore medio dei tre provini

\*\*\* La disuguaglianza deve essere rispettata per il valore medio dei tre provini

(3) Le prove e le misure riportate in Tabella 3-5 devono essere effettuate da un Laboratorio di cui all'art. 59 del DPR 380/2001, con comprovata esperienza e dotato di strumentazione adeguata all'esecuzione delle prove su materiali compositi, in tempo ritenuto utile dal Direttore dei Lavori ai

fini dell'accertamento della qualità e della conformità alle specifiche di progetto dei prodotti oggetto di fornitura e comunque non oltre 30 giorni dalla consegna in cantiere del lotto di spedizione di cui fanno parte i suddetti prodotti.

La richiesta di prove al Laboratorio deve essere sottoscritta dal Direttore dei Lavori e deve contenere almeno:

- indicazione univoca del nome commerciale del prodotto;
- indicazione del cantiere e luogo di installazione del prodotto;
- lotto del materiale fornito e data della posa in opera;
- indicazione del CVT di riferimento.

(4) Non è consentita la possibilità di eseguire alcuna lavorazione in cantiere finalizzata a trasformare i prodotti preformati consegnati dal Fabbrikante, quali la piegatura o altre lavorazioni che possano alterare le caratteristiche meccaniche e di durabilità del prodotto fornito. Le uniche lavorazioni ammesse in cantiere sono il taglio delle barre, eseguito con utensili idonei sotto indicazione del Fabbrikante e l'assemblaggio di barre a creare una rete bidirezionale, in entrambi i casi in maniera tale che non si alteri in alcun modo il comportamento delle singole barre. Nel caso di barre di FRP realizzate con resine termoplastiche, è possibile effettuare la piegatura delle barre solo in stabilimento a valle della produzione.

(5) Qualora il prodotto sia qualificato mediante marcatura CE, il Direttore dei lavori si deve assicurare che il corrispondente Certificato di Costanza della Prestazione e di Conformità del prodotto, rilasciato da idoneo organismo notificato, sia in corso di validità e che il prodotto arrivi in cantiere corredato della *Dichiarazione di Prestazione e Conformità* (DoPC, attualmente Dichiarazione di Prestazione, DoP). In tal caso, le procedure di cui ai punti (1)-(3) non sono necessarie e rimane facoltà del Direttore dei Lavori eseguire o meno ulteriori prove per l'accettazione in cantiere secondo la Tabella 3-5, anche in funzione del fatto che una conservazione non idonea durante le varie fasi di approvvigionamento del materiale potrebbe alterare le caratteristiche meccaniche delle barre.

(6) In Appendice C sono dettagliati i compiti e le responsabilità dei diversi operatori.

## 4 CONCETTI BASILARI DEL PROGETTO

### 4.1 PREMESSA

(1) Il progetto delle strutture di calcestruzzo armato con barre di FRP deve soddisfare le verifiche agli Stati Limite Ultimi (SLU, essenzialmente requisiti di resistenza) e di Esercizio (SLE, requisiti di funzionalità), come definiti nella Normativa vigente. Indicazioni specifiche per le modalità di esecuzione delle verifiche degli elementi di calcestruzzo armato con barre di FRP sono riportate nel presente documento.

(2) In tutte le verifiche 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. Tuttavia, è consentito di non detrarre l'area di calcestruzzo corrispondente alle barre in zona compressa.

(3) 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. Anche le verifiche delle costruzioni in zona sismica devono tenere in debito conto l'assenza di duttilità.

(4) Le presenti Istruzioni prevedono anche il possibile utilizzo combinato nello stesso elemento strutturale di armature di acciaio e di FRP: in tal caso, si parla di sezioni con armature ibride acciaio-FRP.

(5) La temperatura di esercizio dell'elemento in calcestruzzo armato con barre di FRP, stimata secondo la normativa vigente, deve essere compatibile con la temperatura di esercizio delle barre di FRP dichiarata dal Fabbrikante,  $T_{max}$ , in particolar modo, per gli elementi esposti a variazioni termiche significative.

(6) Le barre di FRP mostrano una vulnerabilità significativa alle alte temperature, condizione che limita il loro uso in strutture dove il rischio di incendio è significativo. Occorre eseguire specifiche verifiche di resistenza al fuoco degli elementi strutturali armati con barre di FRP, in accordo con la vigente Normativa antincendio. Le verifiche devono tenere conto del valore della temperatura di transizione vetrosa,  $T_g$ , delle barre di FRP. Poiché il calcestruzzo offre una protezione termica intrinseca alle barre di FRP, l'aumento dello spessore del copriferro e l'uso di aggregati specifici caratterizzati da minore conducibilità termica riducono le temperature nelle barre migliorando la resistenza al fuoco degli elementi strutturali. Inoltre, l'adozione di un sistema di protezione passiva appositamente progettato per garantire che in condizioni di incendio le barre non superino il valore di  $T_g$  estende la validità della verifica di resistenza allo stato limite ultimo in condizioni ordinarie anche al caso di incendio. In ogni caso, le barre di FRP soggette a trazione, se costituite da filamenti continui e se ben ancorate in zone di estremità degli elementi strutturali non direttamente esposte all'azione termica, possono evitare il raggiungimento della crisi dell'elemento, e dunque essere portate in conto nel calcolo della resistenza a flessione. L'Appendice F fornisce metodi semplificati di progettazione e verifica applicabili, in determinate condizioni, per ottimizzare la sicurezza degli elementi strutturali nei confronti dell'incendio.

### 4.2 REQUISITI FONDAMENTALI

(1) 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.

### 4.3 VITA UTILE DELLA STRUTTURA

- (1) 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) 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 vigente.

### 4.4 REQUISITI DI DURABILITÀ

- (1) 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) La vita utile delle barre di FRP qualificate sulla scorta di una Valutazione Tecnica Europea (ETA, *Evaluation Technical Assessment*), secondo l'uso previsto nell'EAD 260023-00-0301 e successive revisioni ed installate in maniera appropriata, è intesa pari a 100 anni, sulla base dell'attuale stato dell'arte e delle conoscenze ed esperienze disponibili.
- (4) 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.

### 4.5 PRINCIPI GENERALI DEL PROGETTO

#### 4.5.1 Generalità

- (1) Si deve verificare, mediante il metodo dei fattori parziali, che, in tutte le situazioni di progetto ed adottando i valori di calcolo delle azioni, delle sollecitazioni e delle resistenze, non sia violato alcuno stato limite, sia relativo a condizioni ultime (SLU) che di esercizio (SLE). Deve cioè risultare:

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

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

- (2) I valori di progetto si ricavano da quelli caratteristici per il tramite di opportuni fattori parziali, i cui valori, per i vari stati limite, sono codificati nella Normativa vigente per i materiali ordinari o indicati nel presente documento per le armature di FRP.

#### 4.5.2 Azioni di calcolo

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

#### 4.5.3 Proprietà dei materiali

(1) I valori delle caratteristiche geometriche e meccaniche delle barre di FRP devono essere determinati mediante misure e prove di laboratorio eseguite secondo procedure standard come indicato nell'Appendice A. Le regole di progettazione presenti in questo documento si applicano esclusivamente ai prodotti per cui siano certificate le caratteristiche elencate in Tabella 3-1, abbiano i diametri con le relative aree effettive indicati in Tabella 3-2 e che ricadano nelle classi riportate in Tabella 3-3.

(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. In assenza di specifiche tecniche delle barre di FRP, si devono utilizzare, per le verifiche riportate nelle presenti Istruzioni, i valori di resistenza e modulo elastico corrispondenti ad una delle classi riportate in Tabella 3-3. Qualora siano note le caratteristiche meccaniche obbligatorie di cui alla Tabella 3-1 per un dato prodotto o qualora il prodotto scelto abbia caratteristiche meccaniche maggiori di quelle di soglia delle classi e purché le caratteristiche obbligatorie siano state ottenute sulla base di qualificazione eseguita secondo EAD-barre FRP o LG-barre FRP), è possibile utilizzare le resistenze effettive fornite dal Fabbrikante.

(3) Il valore di calcolo,  $X_d$ , della resistenza a trazione e della corrispondente deformazione della barra di FRP può essere espresso in forma generale mediante la seguente relazione:

$$X_d = \eta_T \cdot \eta_a \cdot \eta_{c,d} \frac{X_k}{\gamma_f}, \quad (4.2)$$

Dove:

- $X_k$  è il valore caratteristico del parametro di resistenza o di deformazione. Nel caso  $X_k$  rappresenti la resistenza  $f_{tk0}$ , essa corrisponde al valore che individua la classe secondo quanto riportato in Tabella 3-3;
- $\eta_T$  è un fattore che tiene conto degli effetti della temperatura, da valutarsi secondo quanto riportato nel § 4.7.1;
- $\eta_a$  è un fattore di conversione ambientale che tiene conto della durabilità delle barre in funzione delle condizioni di esposizione ambientale, da valutarsi secondo quanto riportato nel § 4.7.1;
- $\eta_{c,d}$  è un fattore di conversione relativo ad effetti di fatica statica dovuta a carichi lunga durata (*creep*), da valutarsi secondo quanto riportato nel § 4.7.2;
- $\gamma_f$  è il fattore parziale delle barre di FRP, da valutarsi secondo quanto riportato nel § 4.6.

#### 4.5.4 Capacità resistente di calcolo

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

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

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.),  $\gamma_{Rd}$  è un fattore parziale che tiene conto delle incertezze insite nel suddetto modello. Se non espressamente indicato, tale fattore si assume pari ad 1.

Come argomenti della funzione  $R\{\cdot\}$  figurano, in generale, parametri meccanici e geometrici, di cui  $X_{d,i}$  e  $a_{n,i}$  sono, rispettivamente, i valori di progetto ed i valori nominali.

#### 4.6 FATTORI PARZIALI PER I MATERIALI

(1) Per gli stati limite ultimi, il valore da attribuire al fattore parziale relativo alle barre di FRP,  $\gamma_f$ , è pari a 1.25 per azioni permanenti e variabili, pari a 1.10 per azioni eccezionali. Dettagli sulla procedura seguita per definire il valore del fattore parziale  $\gamma_f$  sono riportati nell'Appendice B.

(2) Per tutte le verifiche agli stati limite di esercizio, il valore da attribuire al fattore parziale è  $\gamma_f = 1$ .

(3) Per il calcestruzzo e le armature di acciaio (nel caso di strutture con armature ibride) devono essere adottati i fattori parziali previsti dalla Normativa vigente.

#### 4.7 PROBLEMI SPECIALI DI PROGETTO

##### 4.7.1 Azioni ambientali e della temperatura

(1) Le proprietà meccaniche (per esempio la resistenza a trazione, la deformazione ultima ed il modulo di elasticità normale) delle barre di FRP possono degradare in presenza di determinate condizioni ambientali quali ambiente alcalino ed umidità (acqua e soluzioni saline).

- Effetti da ambiente alcalino. L'acqua contenuta nei pori del calcestruzzo può provocare un degrado della resina polimerica della barra di FRP. Il danneggiamento della resina dovuto all'attacco di alcali è in genere più grave di quello dovuto all'umidità.

- Effetti dell'umidità (acqua e soluzioni saline). I principali effetti dell'assorbimento di umidità riguardano la resina 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 resina polimerica, dall'interfaccia matrice-fibra e dalla composizione e qualità delle barre.

(2) L'effetto complessivo dell'ambiente sulla resistenza del materiale è tenuto in conto attraverso il fattore di conversione ambientale  $\eta_a$ . La Tabella 4-1 indica, per differenti tipi di fibre e resine e per diverse condizioni di esposizione della struttura armata con barre di FRP, i valori da attribuire al fattore di conversione ambientale  $\eta_a$ .

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

Condizione di esposizione	Tipo di fibra	$\eta_a$
Interna	Carbonio	1.00
	Vetro	0.90
Esterna	Carbonio	0.95
	Vetro	0.80
Aggressiva	Carbonio	0.90
	Vetro	0.70

Per applicazioni in elementi di calcestruzzo armato, è possibile individuare la condizione di esposizione a partire dalle classi di esposizione previste dalla norma UNI EN 206:2021, secondo quanto indicato nella Tabella 4-2.

**Tabella 4-2** – Condizioni di esposizione per utilizzo di barre di FRP in elementi di c.a.

Condizione di esposizione	Classe di esposizione
Interna	(da definire)
Esterna	(da definire)
Aggressiva	(da definire)

(3) Il fattore  $\eta_T$ , che tiene conto degli effetti delle variazioni di temperatura indotte da irraggiamento solare, può essere assunto pari a 0.9 in caso di esposizione esterna di elementi di c.a. direttamente esposti ad irraggiamento solare.

(4) La percentuale di riduzione della resistenza a trazione media dopo esposizione in ambiente alcalino (resistenza a trazione ottenuta dopo un'esposizione ad ambiente alcalino per 3000 ore a 60 °C),  $R_{ct,t}^{3000}$ , (Tabella 3-1 e Appendice A) può essere utilizzata nella (4.2) come sostitutiva del prodotto  $\eta_T \cdot \eta_a$  per esposizione in ambiente aggressivo ed in cui non si possa escludere l'effetto della variazione di temperatura indotta dall'irraggiamento solare.

(5) Qualora le barre di FRP siano impiegate per la realizzazione di costruzioni di calcestruzzo armato a carattere provvisorio (con vita utile non superiore ad un anno), è consentito di adottare  $\eta_a = 1$ ,  $\eta_T = 1$ ,  $\eta_{c,t} = 1$  per qualunque condizione di esposizione.

#### 4.7.2 Fattore di conversione per effetti di lunga durata $\eta_{c,t}$

(1) Alcune proprietà meccaniche (per esempio la resistenza a trazione, la deformazione ultima ed il modulo di elasticità normale) delle barre di FRP degradano sia per effetto di fenomeni reologici, quali la viscosità, il rilassamento e la fatica statica, sia per effetto di carichi ciclici (fatica).

(2) Sono effetti reologici la viscosità, il rilassamento e la fatica statica. Nelle barre di FRP, tali effetti dipendono dalle proprietà della resina e delle fibre di rinforzo in essa inglobate. In genere le matrici termoindurenti (esteri vinili, resine epossidiche e fenoliche) sono meno viscosi di quelle termoplastiche (polipropilene, nylon, policarbonati, ecc.). Poiché la presenza di fibre diminuisce la viscosità della resina, tali fenomeni sono più pronunciati quando la barra di FRP è caratterizzata da una bassa percentuale in volume di fibre.

Le armature di FRP con fibre di carbonio sono meno suscettibili alla rottura da fatica statica rispetto a quelle con fibre di vetro.

(3) Per evitare la rottura delle armature di FRP sotto tensioni prolungate nel tempo (fatica statica), è necessario limitare il valore della tensione nelle barre in funzione dei carichi persistenti nel tempo (corrispondenti alla combinazione di carico quasi-permanente). È prevista una specifica verifica sia allo SLU che allo SLE.

Per le verifiche agli SLU, gli effetti di fatica statica prodotti da carichi persistenti sono tenuti in conto definendo il fattore di conversione per carichi di lunga durata  $\eta_{c,t}$ , riportato nella (4.2) e definito come segue:

$$\eta_{c,l} = 1 - (1 - \eta_c) \cdot \frac{\sigma_{f,qp}}{f_{ftk,c}} = 1 - \left( \frac{1}{\eta_c} - 1 \right) \cdot \frac{\sigma_{f,qp}}{f_{ftk0}} \quad (4.4a)$$

dove

- $\sigma_{f,qp}$  è la tensione agente nella barra di FRP per effetto del carico persistente, da calcolarsi con riferimento alla combinazione di carico quasi-permanente;
- $f_{ftk,c}$  è il valore caratteristico della tensione di trazione che porta alla rottura la barra per fatica statica ad un tempo corrispondente alla vita utile della struttura, assunta per convenzione pari a 100 anni;
- $\eta_c = \frac{f_{ftk,c}}{f_{ftk0}}$  è il fattore di conversione per fatica statica a 100 anni, essendo  $f_{ftk}$  il valore caratteristico della resistenza a trazione della barra di FRP in assenza di effetti ambientali, di temperatura o di carichi di lunga durata.

La (4.4a) evidenzia che, nella combinazione di azioni allo SLU, ed in caso di stato tensionale persistente non trascurabile, per le barre di FRP deve essere considerata una resistenza a trazione ridotta rispetto alla resistenza caratteristica  $f_{ftk0}$ .

Il fattore di conversione  $\eta_{c,l}$  è compreso tra  $\eta_c$  ed 1. È in genere maggiore di  $\eta_c$ , in quanto coincide con esso solo se il livello di tensione persistente  $\sigma_{f,qp}$  è esattamente uguale alla resistenza a lungo termine  $f_{ftk,c}$ . A favore di sicurezza, è possibile assumere  $\eta_{c,l} = \eta_c$  nelle verifiche nei riguardi delle combinazioni di carico allo SLU.

(4) L'EAD-barre FRP indica come ottenere sperimentalmente la tensione  $f_{ftk,c}$  da introdurre nella (4.4a). In assenza di specifiche indicazioni sperimentali per la tensione  $f_{ftk,c}$ , si possono assumere per il fattore di conversione per fatica statica a 100 anni  $\eta_c$  i valori riportati in Tabella 4-3 per i diversi tipi di barra di FRP e calcolare, quindi, la tensione  $f_{ftk,c} = \eta_c \cdot f_{ftk0}$ .

**Tabella 4-3** – Fattore di conversione per fatica statica a 100 anni,  $\eta_c$ , per le barre di FRP

Modalità di carico	Tipo di fibra	$\eta_c$
Quasi permanente e/o ciclico	Vetro	0.40
(viscosità, rilassamento e fatica)	Carbonio	0.90

(5) L'EAD-barre FRP indica come ottenere sperimentalmente anche la resistenza a trazione per fatica statica in condizioni di esposizione ad ambiente alcalino e per  $T=60$  °C; in tal caso si definisce la resistenza  $f_{ftk,ca}$  ed il corrispondente fattore di conversione per fatica statica a 100 anni in condizioni ambientali modificate come  $\eta_{ca} = \frac{f_{ftk,ca}}{f_{ftk0}}$ . Tale fattore di conversione, che quindi tiene conto

contemporaneamente degli effetti di fatica statica in condizioni di esposizione ad ambiente alcalino e per  $T=60$  °C, può essere direttamente utilizzato, in caso di condizione di esposizione in ambiente aggressivo ed in cui non si possa escludere l'effetto della variazione di temperatura indotta dall'esposizione all'irraggiamento solare, per modificare la (4.4a) come segue:

$$\eta_{c,l} = 1 - (1 - \eta_{ca}) \cdot \frac{\sigma_{f,qp}}{f_{ftk0}} = 1 - \left( \frac{1}{\eta_{ca}} - 1 \right) \cdot \frac{\sigma_{f,qp}}{f_{ftk0}} \quad (4.4b)$$

assumendo in tal caso nella (4.2)  $\eta_T = 1$  e  $\eta_a = 1$ .

(6) Si noti che le (4.4a) e (4.4b) richiedono che sia valutato il livello di tensione persistente,  $\sigma_{f,qp}$ , corrispondente alla combinazione di carico quasi-permanente e responsabile della riduzione di resistenza della barra di FRP. Questa tensione può essere stimata secondo la metodologia riportata nel § 7.2 relativo alle verifiche tensionali in esercizio o anche con procedure semplificate in funzione della tipologia dell'elemento strutturale oggetto di verifica.

(7) Nelle verifiche di limitazione delle tensioni allo SLE, al fine di evitare comportamenti non lineari delle barre di FRP per carichi corrispondenti alla combinazione quasi-permanente, la tensione nelle barre di FRP deve essere opportunamente limitata in funzione della resistenza per fatica statica della barra di FRP,  $f_{ftk,c}$  o  $f_{ftk,ca}$ , come riportato al punto (3) del § 7.2.

(8) Per quanto riguarda l'effetto dei carichi ciclici ripetuti (fenomeno della fatica), le prestazioni delle barre di FRP sono generalmente molto buone. Tra le diverse tipologie, le barre di fibre di vetro risultano le più suscettibili a tale fenomeno.

### 4.7.3 Comportamento delle barre di FRP sotto alte temperature

(1) La vulnerabilità dei polimeri organici alle alte temperature può rappresentare una importante criticità per le barre di FRP quando si progettano strutture civili e industriali in cui l'incendio è un evento che deve essere considerato. Il deterioramento delle proprietà meccaniche dei materiali FRP (soprattutto resistenza e modulo di Young), così come delle proprietà di adesione, inizia quando si raggiungono temperature prossime alla temperatura di transizione vetrosa,  $T_g$ . Il valore di  $T_g$  per i prodotti forniti dai principali produttori di FRP varia in genere tra i 100°C e i 175°C, a seconda del tipo di resina.

(2) Il deterioramento delle proprietà meccaniche dipende dal tipo di fibra, dal tipo di trattamento superficiale delle barre e, chiaramente, dalla temperatura raggiunta nel materiale. Le temperature nelle barre di FRP immerse nel calcestruzzo rimangono contenute per un certo numero di minuti, grazie alla bassa conducibilità termica di quest'ultimo. Pertanto, le prestazioni degli elementi di calcestruzzo armato con barre di FRP in caso di incendio possono essere buone, anche in assenza di sistemi di protezione antincendio specifici (ad esempio, sistemi di protezione passiva - costituiti da rivestimenti normali o materiali isolanti speciali - o sistemi di protezione attiva) se il copriferro è sufficiente. Anche il fenomeno di spalling del calcestruzzo, ovvero il distacco del copriferro che protegge la barra dall'esposizione diretta all'incendio, è meno probabile in zone ove le barre sono soggette a trazione, dove il ruolo della barra di FRP è fondamentale per la resistenza dell'elemento.

(3) La verifica della resistenza in condizioni di incendio per gli elementi di calcestruzzo armato (EN 1992-1-2:2023) prevede che l'effetto di progetto in condizioni di incendio al tempo  $t$  di esposizione al fuoco,  $E_{f,d,t}$ , sia calcolato combinando le azioni meccaniche per situazioni di progetto eccezionale e che la capacità di progetto nelle medesime condizioni,  $R_{f,d,t}$ , sia calcolata adottando coefficienti parziali di sicurezza unitari per tutti i materiali ( $\gamma_M = 1.0$ ).

(4) Lo sviluppo e la distribuzione della temperatura all'interno degli elementi strutturali esposti al fuoco (ossia il campo termico) possono essere valutati separando i modelli di risposta termica e meccanica secondo indicazioni normative di comprovata validità (EN1992-1-2, 2023). Il campo termico dovrebbe essere valutato risolvendo il problema della propagazione del calore dovuta alla radiazione e alla convezione dai gas di combustione alla superficie esterna dell'elemento e considerando l'eventuale presenza di materiali protettivi. Le proprietà termiche del calcestruzzo devono essere valutate secondo indicazioni normative di comprovata validità (EN1992-1-2, 2023), mentre la presenza delle barre di FRP può essere trascurata nel modello termico a causa delle ridotte dimensioni.

(5) L'effetto delle alte temperature sulla resistenza e sulla rigidità del calcestruzzo può essere valutato secondo indicazioni normative di comprovata validità (EN1992-1-2, 2023). In Appendice F è

riportata, a titolo di esempio, una procedura semplificata di verifica a flessione in condizioni di incendio.

**Bibliografia essenziale**

1. EN 1990:2023, Eurocode - Eurocode - Basis of structural and geotechnical design. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium
2. CEN (2023), Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. EN 1992-1-1.
3. EAD (2024), EAD 260023-00-0301, *Carbon, glass, basalt and aramid fibre reinforced polymer bars as reinforcement of structural elements*. 2019, EOTA, OJ Publication: Decision (EU) 2024/1944.
4. LG (2021), *Linea guida per l'identificazione, la qualificazione e l'accettazione di barre e staffe in composito fibrorinforzato per uso strutturale*, Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Dicembre 2021.

## 5 IL MECCANISMO DI ADERENZA

### 5.1 L'ADERENZA DELLE BARRE DI FRP NEL CALCESTRUZZO

(1) L'aderenza tra il calcestruzzo e le barre di FRP è un aspetto fondamentale per il comportamento della sezione rinforzata sia in condizioni ultime che di servizio. La corretta collaborazione tra la barra di FRP ed il calcestruzzo è assicurata dal meccanismo di aderenza che si sviluppa tra di essi per il tramite di tensioni tangenziali lungo l'interfaccia barra di FRP – calcestruzzo.

(2) Ai fini progettuali, la qualità dell'aderenza influenza, nelle verifiche allo Stato Limite Ultimo, il valore della minima lunghezza di ancoraggio di cui la barra di FRP deve essere provvista per garantire che possa attingere una fissata tensione di progetto, mentre allo Stato Limite di Esercizio influenza le verifiche di fessurazione (controllo dell'apertura delle fessure) e di deformabilità (controllo dei massimi spostamenti flessionali dell'elemento) attraverso alcuni coefficienti che tengono conto della qualità dell'aderenza.

(3) Il meccanismo di aderenza di barre di FRP inserite in elementi di calcestruzzo dipende, in genere, dalla geometria e dalle proprietà meccaniche della barra, dalle proprietà chimico-fisiche della sua superficie, dalla resistenza del calcestruzzo, dallo spessore del ricoprimento e, in modo più contenuto, dalla posizione della barra rispetto alla direzione del getto. Nel caso di barre di FRP, il meccanismo di aderenza è influenzato principalmente dalle proprietà meccaniche (moduli di elasticità normale e tangenziale, coefficiente di Poisson) e dalle caratteristiche geometriche (forma, diametro o dimensioni) delle barre, oltre che dal loro trattamento superficiale (sabbatura, presenza di scanalature o risalti superficiali ottenuti con differenti tecnologie di produzione). In funzione del tipo di trattamento superficiale, assumono importanza le caratteristiche geometriche della superficie (dimensione e spaziatura dei risalti), la rigidezza e resistenza a taglio degli eventuali risalti presenti sulla superficie, la scabrosità della sabbatura.

(4) La crisi per aderenza, ovvero lo scorrimento della barra di FRP dal calcestruzzo, può avvenire in corrispondenza della superficie di contatto barra – calcestruzzo oppure con formazione di bielle compresse di calcestruzzo nell'intorno della barra, in funzione della sua finitura superficiale. La resistenza a compressione del calcestruzzo ha una minore influenza sul meccanismo di aderenza rispetto al caso delle barre d'acciaio. Infatti, l'azione delle bielle compresse di calcestruzzo che si formano tra i risalti delle barre (“mechanical interlocking”) nel caso di barre di acciaio si riesce ad attivare efficacemente, mentre nel caso di barre di FRP si attiva solo se esse sono dotate di una dentatura superficiale sufficientemente rigida e resistente da produrre la fessurazione circonferenziale del calcestruzzo circostante. Evidenze sperimentali hanno, comunque, dimostrato buone capacità di aderenza delle barre di FRP, conseguenza dell'adesione chimico-fisica che si instaura all'interfaccia barra-calcestruzzo e di un meccanismo attritivo, che, in genere, raggiunge la sua massima resistenza a seguito del danneggiamento rilevante della superficie della barra e di un limitato danneggiamento nel calcestruzzo circostante. Il meccanismo attritivo è condizionato sia dal trattamento superficiale sia dal modulo elastico e dal coefficiente di Poisson delle barre che ha effetto sulla strizione della barra; tale fenomeno è più rilevante nelle barre di FRP rispetto a quelle di acciaio a causa del minore modulo elastico e, quindi, della maggiore deformazione longitudinale e trasversale. Poiché il modulo elastico ed il coefficiente di Poisson delle barre di FRP dipendono dal tipo e percentuale volumetrica di resina e fibre, anche questi due parametri possono avere un'influenza rilevante sul meccanismo di aderenza.

(5) I trattamenti superficiali più comuni riscontrabili nelle barre di FRP presenti in commercio permettono di identificare le seguenti macro-categorie:

1. Barre sabbiate (*sand-coated*): un sottile strato di sabbia e/o di piccole particelle abrasive viene incollato sulla superficie delle barre al fine di aumentare la rugosità della superficie (Figura 5-1a) e migliorare l'adesione chimico-fisica;

2. Barre nervate (*ribbed*): sulla superficie delle barre sono presenti nervature lungo tutta la lunghezza, in genere realizzate mediante risalti di resina (Figura 5-1b). In questo caso l'obiettivo è il miglioramento del meccanismo di ingranamento tramite una modifica locale della forma delle barre;
3. Barre dentellate (*indented*): la superficie delle barre è dentellata lungo tutta la lunghezza grazie alla presenza di una serie di intaccature e risalti, in genere realizzati mediante fibre e resina (Figura 5-1c), a cui si aggiunge a volte anche la sabbiatura (Figura 5-1d). Anche in questo caso l'obiettivo è il miglioramento del meccanismo di ingranamento tramite non solo la modifica della forma delle barre, ma anche tramite l'incremento dell'area di adesione del calcestruzzo alla barra.
4. Barre con avvolgimento a spirale (*Helically wrapped*): fibre di diversa natura sono avvolte a spirale intorno la barra (Figura 5-1e), in alcuni casi con l'aggiunta anche della sabbiatura (Figura 5-1-f). In tal caso, l'obiettivo è l'aumento della rugosità della superficie, il miglioramento dell'ingranamento e l'incremento dell'area di contatto calcestruzzo-barra.

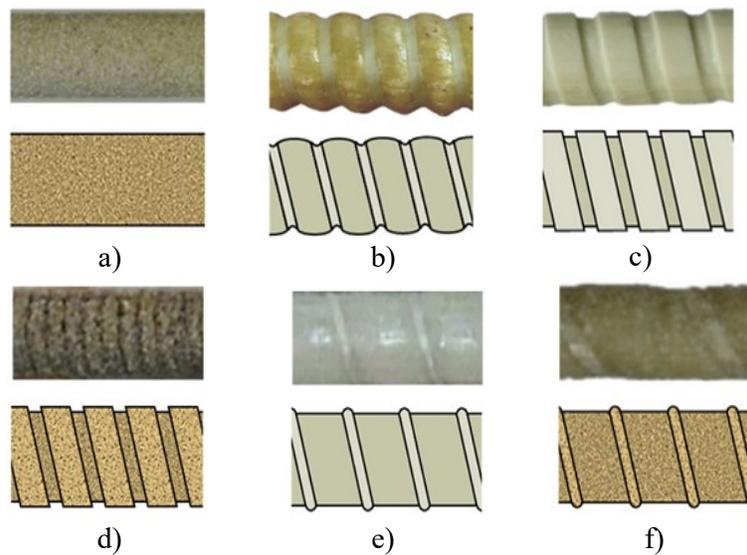


Figura 5-1 Esempi dei più comuni trattamenti superficiali delle barre di FRP: a) barre sabbiate; b) barre nervate; c) barre dentellate; d) barre dentellate con sabbiatura; e) barre con avvolgimento a spirale; f) barre con avvolgimento a spirale e sabbiatura.

Si evidenzia che esistono anche barre senza alcun trattamento superficiale (barre lisce) per le quali l'entità dei fenomeni adesivi ed attritivi che si sviluppano all'interfaccia con il calcestruzzo potrebbe rendere le barre di FRP non idonee all'utilizzo ai fini del presente documento se non si raggiunge la soglia minima di tensione tangenziale massima da valutarsi mediante prove sperimentali di aderenza (si veda §5.3). E', pertanto, altamente consigliato utilizzare barre con un trattamento superficiale minimo che garantisca un'adeguata trasmissione di tensioni tangenziali tra la barra di FRP e il calcestruzzo circostante.

## 5.2 MODELLAZIONE DEL LEGAME DI ADERENZA

(1) Il meccanismo di aderenza può essere modellato a diversi livelli di dettaglio. In genere, per condurre analisi di tipo strutturale si adotta un macro-legame di aderenza che stabilisce una relazione tra le tensioni tangenziali e gli scorrimenti che nascono all'interfaccia barra-calcestruzzo. Tale legame può essere ottenuto per via sperimentale secondo quanto indicato nel § 5.3.

(2) Il legame di aderenza deve riflettere le caratteristiche chimico-fisico-meccaniche dei diversi tipi di trattamento superficiale realizzati sulle barre di FRP, anche in considerazione della classe di resistenza del calcestruzzo che le circonda. Il meccanismo di interlocking dipende, infatti, sia dalla resi-

stenza e rigidità dei risalti della barra (nelle barre ad esempio nervate o dentellate) sia dalla resistenza a trazione del calcestruzzo. Una stessa barra di FRP, in grado di sviluppare un buon ingranamento, potrebbe essere in grado o meno di causare la fessurazione ed il tranciamento delle bielle di calcestruzzo in funzione della resistenza di quest'ultimo.

(3) Il legame di aderenza può essere valutato su base sperimentale per la specifica tipologia di barra di interesse (si veda § 5.3), ma, in maniera esemplificativa, si possono considerare due tipi di legami, in funzione del meccanismo prevalente:

- a) legame di aderenza basato principalmente sull'adesione chimico-fisica all'interfaccia barra-calcestruzzo;
- b) legame di aderenza basato sia sull'adesione chimico-fisica sia sull'ingranamento meccanico (*'interlocking'*) che si instaura all'interfaccia barra-calcestruzzo e più o meno rilevante in funzione della tipologia di trattamento superficiale.

Nel caso di meccanismo di aderenza basato essenzialmente sull'adesione chimico-fisica, il legame di aderenza ha l'andamento tipico riportato in Figura 5.2a; in genere, è presente un primo tratto ascendente in cui la tensione tangenziale aumenta in assenza di scorrimento fino al raggiungimento del valore massimo. Superato il picco, la curva mostra un rapido decadimento dell'aderenza sino all'annullamento della tensione tangenziale o al raggiungimento di una tensione residua, dovuta all'attrito barra-calcestruzzo, che rimane costante, mentre gli scorrimenti barra-calcestruzzo aumentano.

Nel caso di meccanismo di aderenza basato anche su ingranamento meccanico (*'interlocking'*), il legame di aderenza ha l'andamento tipico riportato in Figura 5.2b. In questo caso, il tratto in cui si realizza l'adesione chimica è seguito da un secondo tratto ascendente in cui la tensione all'interfaccia aumenta all'aumentare dello scorrimento ed il meccanismo dominante in tale fase è dovuto al contributo dell'ingranamento degli inerti nelle nervature della barra. Anche in questo caso, raggiunta la tensione tangenziale di picco, che assume, però, valori più alti di quelli raggiunti nel caso del legame basato sull'adesione chimico-fisica, si evidenzia una fase discendente e lo sviluppo di un meccanismo tipicamente attritivo caratterizzato da una tensione residua fino allo sfilamento della barra.

(4) Nel caso di barre di FRP in grado di attivare un rilevante *interlocking* meccanico, il legame di aderenza deve tener conto anche della possibilità che si verifichi una crisi per "splitting" del calcestruzzo, completo o parziale, prima dello sfilamento della barra nel caso in cui il ricoprimento di calcestruzzo non sia sufficiente. Per maggiori dettagli sulla definizione dei valori minimi del ricoprimento si rimanda al § 6.8.1.

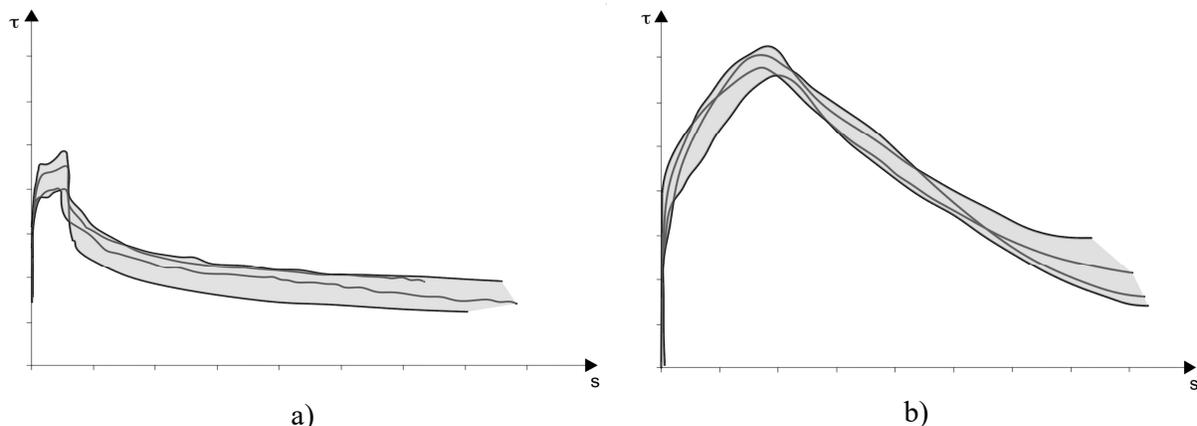


Figura 5.2 – Esempi di legami di aderenza di barre di FRP: a) meccanismo basato su adesione chimico-fisica, b) meccanismo basato su adesione chimica e ingranamento meccanico (*interlocking*).

### 5.3 CARATTERIZZAZIONE DEL LEGAME DI ADERENZA TRAMITE PROVE SPERIMENTALI

(1) La completa caratterizzazione del legame di aderenza richiede l'esecuzione di specifiche prove sperimentali. La prova di pull-out (Figura 5.3) è la più frequentemente utilizzata per ottenere una relazione sperimentale tra la tensione tangenziale di aderenza (assunta costante lungo la parte aderente della barra) e lo scorrimento tra calcestruzzo e barre di FRP (legame  $\tau_b$ -s). Poiché la tensione tangenziale di aderenza è in realtà variabile lungo la barra, la prova di pull-out è condotta considerando una lunghezza aderente tra barra e calcestruzzo limitata, in modo da poter considerare accettabile l'ipotesi di tensioni tangenziali costanti lungo la barra.

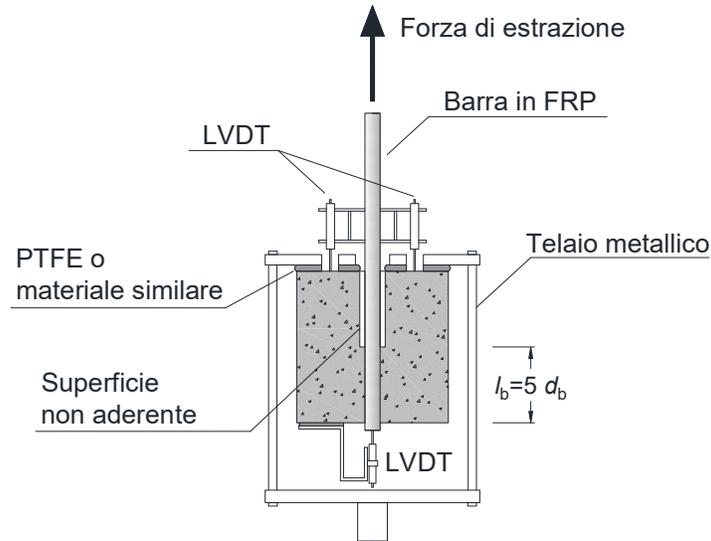


Figura 5.3 – Schema di una prova di pull-out per la caratterizzazione sperimentale del legame di aderenza di barre di FRP

(2) La qualità dell'aderenza di barre di FRP deve essere riscontrata tramite prove di pull-out su almeno 5 campioni. Ai fini di tale valutazione, le prove di pull-out devono essere condotte su barre di FRP immerse in blocchi di calcestruzzo di classe C20/25 con una lunghezza aderente  $\ell_b$  pari a 5 volte il diametro effettivo della barra di FRP,  $d_{\text{eff}}$ , seguendo le indicazioni riportate nelle vigenti indicazioni per la qualificazione (EAD-barre FRP o LG-barre FRP).

Assumendo una distribuzione costante delle tensioni tangenziali nella lunghezza aderente  $\ell_b$ , il valore di picco della tensione tangenziale,  $\tau_b$ , si calcola in corrispondenza del carico massimo  $F_{\text{max}}$  ottenuto in ciascuna prova di pull-out, purché la rottura sia avvenuta all'interfaccia barra di FRP-calcestruzzo, come segue:

$$\tau_b = \frac{F_{\text{max}}}{\pi d_{\text{eff}} \cdot \ell_b} \quad \text{con } \ell_b = 5 d_{\text{eff}} \quad (5.1)$$

Ai fini della qualificazione dell'aderenza, si deve considerare la media dei valori di picco,  $\tau_{\text{bm}}$ , ottenuta sulla base dei risultati di almeno 5 prove di pull-out.

La qualità dell'aderenza barra – calcestruzzo può essere classificata secondo le seguenti classi:

Classe 1:  $\tau_{\text{bm}} > 15.0 \text{ MPa}$

Classe 2:  $7.0 \text{ MPa} \leq \tau_{\text{bm}} \leq 15.0 \text{ MPa}$

Le indicazioni progettuali riportate nelle presenti Istruzioni non si intendono valide per barre di FRP per le quali le prove di aderenza abbiano evidenziato una  $\tau_{\text{bm}} < 7.0 \text{ MPa}$ .

## 5.4 LUNGHEZZA DI ANCORAGGIO

(1) Poiché la resistenza delle barre di FRP è particolarmente elevata, spesso non è necessario assicurare che essa sia in grado di ancorare la barra fino alla rottura a trazione della barra stessa. Ciò è particolarmente evidente quando le barre sono ancorate in una zona a ridotta sollecitazione (come nel caso delle estremità di travi appoggiate). Deve essere posta, al contrario, particolare attenzione al caso di ancoraggio delle barre in travi e pilastri di strutture intelaiate progettate in zona sismica, poiché spesso le massime sollecitazioni sono proprio alle estremità degli elementi strutturali.

(2) Per barre rettilinee di FRP in zona tesa, indicato con  $\sigma_{fd}$  il livello di tensione agente nelle barre sotto la combinazione di carico allo SLU, la lunghezza di ancoraggio può essere calcolata con le seguenti espressioni in funzione della classe di qualità dell'aderenza definita nel §5.3:

- per barre di FRP in classe di aderenza 1:

$$\ell_a = k_{cp} \cdot k_\ell \cdot d_b \cdot \left( \frac{\sigma_{fd}}{500} \right)^2 \cdot \left( \frac{25}{f_{ck}} \right)^{4/5} \cdot \left( \frac{d_b}{20} \right)^{2/5} \cdot \left( \frac{1.5d_b}{c_d} \right)^{1/2} \quad k_\ell = 30 \quad (5.2a)$$

- per barre di FRP in classe di aderenza 2:

$$\ell_a = k_{cp} \cdot k_\ell \cdot d_b \cdot \left( \frac{\sigma_{fd}}{500} \right)^{3/2} \cdot \left( \frac{25}{f_{ck}} \right)^{3/5} \cdot \left( \frac{d_b}{20} \right)^{3/10} \cdot \left( \frac{1.5d_b}{c_d} \right)^{1/2} \quad k_\ell = 65 \quad (5.2b)$$

in cui:

- il coefficiente  $k_{cp}$  tiene conto dell'effetto della posizione della barra nel getto sul meccanismo di aderenza (pari a 1.0 o 1.2 per condizioni di buona o scarsa aderenza in funzione dell'inclinazione della barra rispetto all'asse orizzontale, secondo quanto indicato in EN 1992-1-1, 2024);

-  $c_d = \min(c_{geom,x}, c_{geom,y}, 0.5c_i, 3.75d_b)$ , essendo  $c_{geom,x}$  e  $c_{geom,y}$  i copriferri geometrici misurati in direzione orizzontale e verticale, rispettivamente,  $c_i$  l'interfero tra due barre di FRP successive, e  $d_b$  il diametro nominale delle barre di FRP.

Il termine  $\left( \frac{1.5d_b}{c_d} \right)^{1/2}$  si considera nelle (5.2) solo se risulta  $> 1$ .

Tali espressioni, ed in particolare i coefficienti  $k_\ell$ , sono state ottenute attraverso analisi statistiche e regressioni di risultati sperimentali. Se si vuole garantire che sia assicurato l'ancoraggio della barra di FRP soggetta ad un valore di tensione  $\sigma_{fd}$ , la lunghezza di ancoraggio, indicata dalle formule (5.2a, b) e misurata dalla sezione oltre la quale la barra non è più considerata efficace, ma unicamente ancorata, non deve essere comunque inferiore al massimo tra 300 mm e  $20 d_b$  per qualsiasi valore del diametro e qualsiasi classe di qualità dell'aderenza. Pertanto, la lunghezza di ancoraggio di progetto,  $\ell_{ad}$ , deve essere assunta pari a:

$$\ell_{ad} = \max(\ell_a, 300 \text{ mm}, 20d_b) \quad (5.3)$$

(3) Ai fini della valutazione della tensione  $\sigma_{fd}$ , nelle zone soggette a prevalenti sollecitazioni taglianti, si deve tenere conto di un'opportuna traslazione del diagramma del momento flettente secondo quanto indicato nella Normativa vigente per elementi di calcestruzzo con armatura metallica.

(4) Qualora non sia possibile realizzare la lunghezza di ancoraggio di progetto  $\ell_{ad}$  data dalla (5.3), è possibile realizzare l'ancoraggio delle barre dritte mediante sovrapposizione con barre di FRP di uguale diametro nominale e dotate all'estremità di una piegatura a  $90^\circ$  (Figura 5.4). La lunghezza di sovrapposizione della parte dritta della barra piegata aggiuntiva deve essere pari a:

$$\ell_s = 1.25 \cdot \ell_{ad} \quad (5.4)$$

Questa modalità di realizzazione dell'ancoraggio, particolarmente utilizzata per semplificare la distinta dei ferri di progetto (in quanto consente di mantenere rettilinee le barre principali di armatura) deve essere curata con attenzione nel caso di sezioni fortemente armate in quanto si potrebbe raggiungere una elevata congestione delle armature.

La barra piegata deve avere, dopo la sagomatura a 90°, una lunghezza almeno pari a 12 volte il diametro nominale della barra,  $d_b$ :  $L_t \geq 12d_b$ .

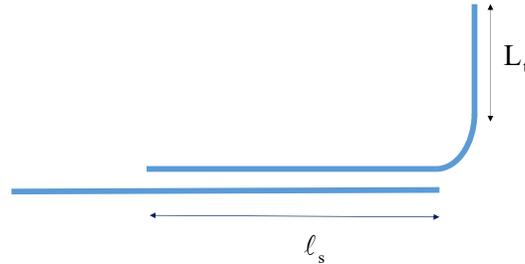


Figura 5.4 – Ancoraggio di barre di FRP realizzato mediante sovrapposizione di barra con piegatura a 90°

(5) Le (5.2) possono essere utilizzate anche per calcolare, nelle sezioni che si trovano ad una distanza  $\ell_b < \ell_a$  dall'estremità della barra di FRP, la massima tensione di progetto che può essere applicata alla barra,  $\sigma_{fd}$ , in funzione della classe di aderenza delle barre di FRP. L'inversione delle (5.2) fornisce, infatti, le seguenti equazioni:

- per barre di FRP in classe di aderenza 1:

$$\sigma_{fd} = k \cdot \left( \frac{\ell_b}{d_b} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{f_{ck}}{25} \right)^{2/5} \cdot \left( \frac{20}{d_b} \right)^{1/5} \cdot \left( \frac{c_d}{1.5d_b} \right)^{1/4} \quad k = 91 \quad (5.5a)$$

- per barre di FRP in classe di aderenza 2:

$$\sigma_{fd} = k \cdot \left( \frac{\ell_b}{d_b} \right)^{2/3} \cdot \left( \frac{f_{ck}}{25} \right)^{2/5} \cdot \left( \frac{20}{d_b} \right)^{1/5} \cdot \left( \frac{c_d}{1.5d_b} \right)^{1/3} \quad k = 31 \quad (5.5b)$$

Il termine funzione di  $\left( \frac{c_d}{1.5d_b} \right)$  si considera nelle (5.5) solo se risulta  $< 1$ .

## 6 COMPORTAMENTO AGLI STATI LIMITE ULTIMI

### 6.1 VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ RESISTENTE A FLESSIONE E PRESSO-FLESSIONE

#### 6.1.1 Fondamenti del calcolo

(1) Il progetto allo stato limite ultimo per sollecitazioni flettenti richiede il dimensionamento dell'elemento strutturale in modo che il momento resistente di progetto  $M_{Rd}$  sia superiore al momento sollecitante di progetto,  $M_{Sd}$ , derivante dalle azioni di progetto agenti sulla struttura:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (6.1)$$

In caso di sollecitazione di presso-flessione, va tenuto in conto nel calcolo del momento  $M_{Rd}$  lo sforzo normale di progetto applicato alla sezione.

(2) Le ipotesi fondamentali su cui si basa il calcolo del momento resistente di progetto  $M_{Rd}$  allo stato limite ultimo della sezione di calcestruzzo armato con barre di FRP sono le seguenti:

- conservazione delle sezioni piane fino a rottura, con diagramma lineare delle deformazioni normali per il calcestruzzo compresso e le barre di FRP tese;
- resistenza nulla del calcestruzzo a sforzi di trazione;
- trascurabilità del contributo delle barre di FRP soggette a tensione di compressione;
- legame costitutivo del calcestruzzo conforme alla Normativa vigente;
- legame costitutivo delle barre di FRP elastico lineare fino a rottura.

Pur trascurando il contributo delle barre di FRP in zona compressa, è consentito non detrarre l'area di calcestruzzo ad esse corrispondente.

(3) La rottura per flessione si manifesta quando si verifica una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della deformazione ultima nel calcestruzzo compresso,  $\varepsilon_{cu}$  (rottura lato calcestruzzo);
- raggiungimento della deformazione ultima di trazione nelle barre di FRP,  $\varepsilon_{fd}$ , (rottura lato barre di FRP) calcolata in funzione della resistenza a trazione di progetto:

$$\varepsilon_{fd} = \frac{f_{fd}}{E_f} = \eta_T \cdot \eta_a \cdot \eta_{c,l} \cdot \frac{f_{fk0}}{\gamma_f}, \quad (6.2)$$

Dove  $\eta_T$ ,  $\eta_a$  e  $\eta_{c,l}$  sono definiti nel §4.7 e  $\gamma_f$  è il fattore parziale relativo alle barre di FRP definito nel § 4.6. Inoltre, nella (6.2) le barre si intendono perfettamente ancorate.

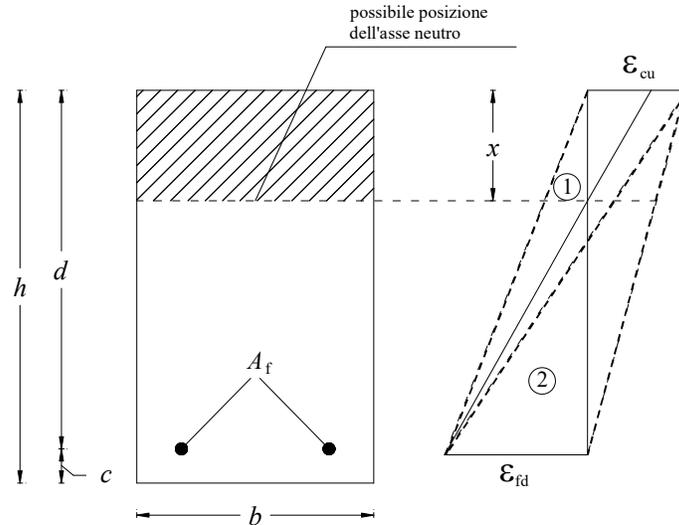
#### 6.1.2 Momento resistente di progetto

(1) Il momento resistente di progetto della sezione si calcola in conformità con le ipotesi riportate nel § 6.1.1.

(2) Poiché il comportamento delle barre di FRP è elastico lineare fino a rottura, le tensioni nelle barre di FRP sono calcolate come prodotto delle deformazioni per il modulo elastico in direzione longitudinale.

(3) Nel caso in cui la rottura della sezione si manifesti per raggiungimento della deformazione ultima nel calcestruzzo compresso,  $\varepsilon_{cu}$ , è possibile avvalersi per quest'ultimo di una distribuzione semplificata costante delle tensioni normali del tipo “*stress-block*”.

(4) Nel caso di flessione semplice, con riferimento alla Figura 6-1, si possono quindi distinguere due campi in cui può variare la retta delle deformazioni a rottura, a seconda che si raggiunga la deformazione ultima dell'armatura di FRP tesa  $\varepsilon_{fd}$  (campo 1) o la deformazione ultima del calcestruzzo compresso  $\varepsilon_{cu}$  con armatura in campo elastico (campo 2).



**Figura 6-1** – Modalità di rottura a flessione di una sezione di calcestruzzo armato con barre di FRP.

(5) Poiché nel campo 1 la rottura si verifica per raggiungimento della deformazione ultima nell'armatura di FRP, un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione dell'armatura,  $\varepsilon_{fd}$ . Tale valore, nel caso di disposizione delle armature in più registri, si intende riferito al baricentro delle barre più distanti dall'asse neutro.

Le deformazioni nella sezione possono essere calcolate sulla base della linearità del diagramma per il tramite delle seguenti relazioni (si veda Figura 6-1):

- calcestruzzo al lembo compresso: 
$$\varepsilon_c = \varepsilon_{fd} \cdot \frac{x}{(d-x)} \leq \varepsilon_{cu} \quad (6.3)$$

- fibra baricentrica delle barre di FRP: 
$$\varepsilon_f = \varepsilon_{fd} \quad (6.4)$$

dove  $x$  rappresenta la distanza dell'asse neutro dal lembo superiore.

La deformazione ultima nelle barre di FRP,  $\varepsilon_{fd}$ , è definita dalla (6.2) se la sezione in cui si effettua la verifica si trova ad una distanza dall'estremità della barra di FRP maggiore o uguale della lunghezza ancoraggio definita dalle (5.2) e calcolata assumendo  $\sigma_{fd} = f_{fd} = \varepsilon_{fd} \cdot E_f$  o se sono previste barre piegate a  $90^\circ$  in sovrapposizione per garantire un idoneo ancoraggio (Figura 5.4).

In caso contrario, la deformazione ultima per la barra può essere calcolata come  $\varepsilon_{fd} = \frac{\sigma_{fd}}{E_f} < f_{fd}$ , dove

$\sigma_{fd}$  è data dalle (5.5) in funzione della distanza  $\ell_b$  della sezione di verifica dall'estremità della barra di FRP e della classe di qualità dell'aderenza delle barre di FRP.

(6) Nel campo 2, la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo, mentre la deformazione nell'armatura di FRP è inferiore alla sua deformazione ultima: in tal caso, fissata la deformazione ultima del calcestruzzo compresso,  $\varepsilon_{cu}$ , le deformazioni nella sezione possono essere calcolate sulla base delle linearità del diagramma delle deformazioni, come segue (si veda Figura 6-1):

- calcestruzzo al lembo compresso:  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$  (6.5)

- fibra baricentrica delle barre di FRP:  $\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d-x}{x} \leq \varepsilon_{fid}$ , (6.6)

Per la valutazione di  $\varepsilon_{fid}$  valgono le stesse considerazioni riportate al punto (5).

(7) Per entrambe le tipologie di rottura (campo 1 e campo 2), la distanza dell'asse neutro,  $x$ , dal lembo compresso è determinata per mezzo dell'equazione di equilibrio alla traslazione:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} - A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f = N_{sd} \quad (6.7)$$

Nel caso di flessione semplice, si assumerà  $N_{sd} = 0$ , mentre in caso di pressoflessione, si costruisce un dominio di interazione  $N_{sd}$ - $M_{Rd}$  al variare di  $N_{sd}$ .

Nella (6.7),  $f_{cd}$  è il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo, e con riferimento al caso di sezione rettangolare riportato in Figura 6-1,  $b$ ,  $d$  e  $h$  sono base, altezza utile ed altezza della sezione in calcestruzzo,  $x$  è la distanza dell'asse neutro dal bordo compresso della sezione di calcestruzzo,  $A_f$  è l'area complessiva di barre tese di FRP,  $E_f$  è il modulo elastico delle barre di FRP,  $\psi$  è un coefficiente adimensionale pari a 0.8095 in caso di campo di rottura 2 ed espresso dalle seguenti relazioni ( $\varepsilon_c$  espressa in ‰) in caso di campo di rottura 1:

$$\psi = \begin{cases} \varepsilon_c \left( 0.5 - \frac{\varepsilon_c}{12} \right) & \text{per } \varepsilon_c \leq 2.00\text{‰} \\ 1 - \frac{2}{3\varepsilon_c} & \text{per } 2.00\text{‰} \leq \varepsilon_c \leq 3.50\text{‰} \end{cases} \quad (6.8)$$

In caso di campo di rottura 1, la (6.7) può essere risolta iterativamente, essendo il coefficiente  $\psi$  funzione della deformazione al lembo compresso del calcestruzzo  $\varepsilon_c$ .

Il momento resistente,  $M_{Rd}$ , può essere infine ricavato dall'equazione di equilibrio alla rotazione rispetto al baricentro geometrico della sezione in calcestruzzo:

$$M_{Rd} = \psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (0.5h - \lambda \cdot x) + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot (0.5h - c) \quad (6.9)$$

Nella (6.9),  $c$  è la distanza del baricentro delle barre di FRP dal bordo teso della sezione (copriferro meccanico),  $\lambda$  è un coefficiente adimensionale pari a 0.4160 in caso di campo di rottura 2 ed espresso dalle seguenti relazioni ( $\varepsilon_c$  espressa in ‰) in caso di campo di rottura 1:

$$\lambda = \begin{cases} \frac{8 - \varepsilon_c}{4(6 - \varepsilon_c)} & \text{per } \varepsilon_c \leq 2.00\text{‰} \\ \frac{\varepsilon_c(3\varepsilon_c - 4) + 2}{2\varepsilon_c(3\varepsilon_c - 2)} & \text{per } 2.00\text{‰} \leq \varepsilon_c \leq 3.50\text{‰} \end{cases} \quad (6.10)$$

Si sottolinea che in caso di campo di rottura 2, i valori fissi  $\psi = 0.8095$  e  $\lambda = 0.4160$ , sono giustificati dalla condizione di raggiungimento della deformazione ultima nel calcestruzzo compresso ( $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ ) e corrispondono all'adozione della distribuzione semplificata delle tensioni normali nel calcestruzzo nota come '*stress block*'.

## 6.2 PRINCIPI DEL PROGETTO A FLESSIONE SOTTO AZIONI DA INCENDIO

(1) Nelle verifiche al fuoco di strutture in calcestruzzo armato con barre di FRP, per un fissato valore di tempo di esposizione e in determinate condizioni ambientali, l'analisi termica fornisce il campo termico nella sezione trasversale dell'elemento strutturale. Di conseguenza, è necessario considerare una legge tensione-deformazione funzione della temperatura,  $\sigma(\varepsilon, T_i)$ , per ciascun materiale della sezione trasversale. Le proprietà meccaniche necessarie per la verifica (modulo elastico, resistenza massima e deformazione ultima) delle barre di FRP alle alte temperature devono essere fornite dal Fabbrikante e valutate sulla base di procedure di prova standardizzate a livello nazionale o internazionale. In assenza di una procedura standardizzata, è possibile valutare tali proprietà seguendo le procedure di prova previste per le prove di trazione a temperatura ambiente, utilizzando una camera climatica in grado di riscaldare uniformemente il campione nella parte centrale dove avviene la misura del campo deformativo (mediante tecniche fotogrammetriche ormai consolidate, finalizzate alla stima della deformabilità) e la rottura del campione stesso.

(2) Per le strutture di calcestruzzo armato con barre di FRP, si sottolinea che:

- è possibile ottenere una maggiore resistenza al fuoco utilizzando uno spessore maggiore di copriferro; la temperatura raggiunta nelle barre dipende in gran parte dal copriferro, mentre la resistenza al fuoco dipende dalla resistenza delle fibre alle alte temperature e, quindi, può dipendere dal tipo di fibra;
- il tipo di aggregato utilizzato per il calcestruzzo può modificare la resistenza al fuoco, sia a causa delle diverse conducibilità sia della sensibilità allo sfaldamento; per il primo aspetto si può far riferimento alle curve di conducibilità del materiale proposte dalla Normativa vigente o da indicazioni di comprovata validità (EN1992-1-2) per gli elementi di calcestruzzo armato con barre metalliche. Il secondo aspetto è generalmente trascurato nelle verifiche di sicurezza;
- a causa del rammollimento della resina, la barra perde l'adesione con il calcestruzzo, che avviene quando la temperatura della barra di FRP supera la temperatura di transizione vetrosa,  $T_g$ ; pertanto un primo meccanismo di collasso a flessione è per incapacità della barra di assorbire trazione. Questo meccanismo, molto penalizzante, può essere scongiurato se almeno le zone di estremità della barra garantiscono sufficiente aderenza. In questa condizione, il meccanismo di collasso da verificare è per raggiungimento del limite di resistenza a trazione della barra che si riduce all'aumentare della temperatura;
- per avere un sufficiente ancoraggio delle barre è necessario garantire una zona "fredda" all'estremità dell'elemento strutturale di lunghezza almeno pari alla lunghezza di ancoraggio della barra calcolata a temperatura ambiente secondo le (5.2). La valutazione delle temperature alle estremità degli elementi in cui ancorare le barre può tener conto dell'uso di specifici sistemi protettivi antincendio (per esempio lastre e intonaci) utilizzati limitatamente per l'estensione necessaria a garantire la zona "fredda". È possibile ricorrere all'uso di analisi termiche e modelli di aderenza avanzati per ridurre o evitare l'uso di sistemi protettivi agiuntivi;
- l'uso di barre sovrapposte nella zona esposta al fuoco può portare a un cedimento prematuro dell'elemento in calcestruzzo, in quanto il deterioramento della resistenza di adesione nella zona esposta al fuoco può verificarsi prima della diminuzione della resistenza a trazione nelle barre. Per evitare questo cedimento prematuro, si deve utilizzare un'armatura continua nella zona dell'elemento in calcestruzzo potenzialmente esposta al fuoco.

(3) Tenendo conto dei parametri che svolgono un ruolo chiave nel comportamento degli elementi di FRP, in Appendice F si presentano un metodo semplificato di progettazione o verifica.

### 6.3 VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ RESISTENTE A TAGLIO

(1) Con riferimento ad elementi di c.a. con armature trasversali resistenti a taglio interamente costituite da staffe di FRP o ibride, costituite, cioè, da staffe di acciaio e staffe di FRP, il presente documento si riferisce al solo caso di staffe (di FRP o di FRP e di acciaio) disposte perpendicolarmente all'asse dell'elemento.

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

#### 6.3.1 Elementi senza armature trasversali resistenti a taglio

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

(2) Allo SLU, la resistenza di progetto a taglio di un elemento armato longitudinalmente con barre di FRP e privo di armatura trasversale può essere valutata mediante la seguente relazione, che tiene conto dei vari meccanismi di resistenza a taglio che si mobilitano nelle travi di calcestruzzo armato:

$$V_{Rd,ct} = \frac{k_s}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left( 100\rho_1 \cdot \frac{E_f}{210} \cdot f_{ck} \right)^{1/3} \cdot b_w \cdot d \geq V_{Rd,ct,min} \quad (6.11a)$$

$$V_{Rd,ct,min} = 0.035 \cdot k^{3/2} \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (6.11b)$$

Nelle (6.11) i simboli utilizzati hanno il seguente significato:

- $k_s$  è un coefficiente calibrato su base sperimentale, pari a 0.20 in caso di armatura longitudinale costituita da barre di FRP sia in fibra di vetro sia di carbonio;
- $b_w$  e  $d$  sono larghezza e altezza utile della sezione; in caso di sezione non rettangolare,  $b_w$  è larghezza dell'anima;
- $\rho_1 = A_f / (b \cdot d) \leq 0.02$  è il rapporto geometrico di armatura longitudinale tesa  $A_f$  adeguatamente ancorata, cioè che si estende per non meno di  $(\ell_{bd} + d)$  oltre la sezione considerata, dove  $\ell_{bd}$  è la lunghezza di ancoraggio, definita dalle 5.2;
- $f_{ck}$  è la resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo;
- $\gamma_c$  è il fattore parziale di sicurezza del calcestruzzo;
- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$ ;
- $E_f$  è il modulo elastico delle barre di FRP che costituiscono l'armatura longitudinale espresso in GPa.

In alternativa alla (6.11a) è possibile utilizzare la seguente espressione:

$$V_{Rd,ct} = \frac{k'_s}{\gamma_c} \cdot \left( 100\rho_1 \cdot \frac{E_f}{210} \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d} \right)^{1/3} \cdot b_w \cdot d \geq V_{Rd,ct,min} \quad (6.11c)$$

in cui oltre ai simboli già introdotti,  $k'_s$  è un coefficiente calibrato su base sperimentale, pari a 0.82 in caso di armatura longitudinale costituita da barre di FRP sia in fibra di vetro sia di carbonio,  $E_f$  è il modulo elastico delle barre di FRP espresso in GPa,  $d_{dg}$  è un parametro funzione della scabrezza del calcestruzzo che può essere assunto pari a:

$$d_{dg} = 16 \text{ mm} + D_{min} \leq 40 \text{ mm per calcestruzzi con } f_{ck} \leq 60 \text{ MPa};$$

$$d_{dg} = 16 \text{ mm} + D_{\min} \left( \frac{60}{f_{ck}} \right) \leq 40 \text{ mm per calcestruzzi con } f_{ck} > 60 \text{ MPa};$$

essendo  $D_{\min}$  il minimo diametro degli inerti.

### 6.3.2 Elementi con armature trasversali di FRP resistenti a taglio

(1) Allo SLU, la resistenza di calcolo a taglio dell'elemento armato con barre longitudinali e staffe di FRP è valutabile mediante uno schema di funzionamento a traliccio. Gli elementi resistenti dell'ideale traliccio sono: le staffe di FRP, le armature longitudinali di FRP, il corrente compresso di calcestruzzo e le bielle compresse di calcestruzzo d'anima con inclinazione  $\theta$ .

(2) La resistenza di progetto a taglio della trave è pari al minimo valore tra le resistenze associate alla crisi delle bielle compresse di calcestruzzo,  $V_{Rd,c}$ , (crisi per taglio-compressione), ed alla crisi dovuta al superamento della somma della resistenza a trazione delle staffe di FRP,  $V_{Rd,f}$ , e del contributo dei meccanismi resistenti del calcestruzzo,  $V_{Rd,ct}$ , (crisi per taglio-trazione):

$$V_{Rd} = \min(V_{Rd,f} + V_{Rd,ct}; V_{Rd,c}) \quad (6.12)$$

(3) Il contributo relativo alla crisi per superamento della resistenza a trazione delle staffe di FRP, da introdurre nella (6.12) si calcola come:

$$V_{Rd,f} = 0.9d \frac{A_{fw}}{s} f_{ubd} \cot \theta \quad (6.13)$$

In assenza di specifiche indicazioni ed in considerazione del limitato numero di dati sperimentali disponibili, si può assumere  $\theta = 45^\circ$  ( $\cot \theta = 1$ ).

Nella (6.13),  $A_{fw}$  è l'area dell'armatura a taglio di FRP posta lungo l'elemento con interasse  $s$ ,  $f_{ubd}$  è il valore di progetto della resistenza a trazione della parte piegata delle staffe di FRP, da calcolarsi come segue:

$$f_{ubd} = \eta_a \cdot \eta_T \cdot \frac{f_{ubk}}{\gamma_f} \quad (6.14)$$

dove  $\gamma_f$  è il fattore parziale di sicurezza del materiale FRP da assumersi pari a 1.25,  $\eta_T$  e  $\eta_a$  sono i coefficienti di conversione che tengono conto di effetti della temperatura e delle condizioni ambientali, come definiti nel §4.5,  $E_f$  è il valore medio del modulo elastico della staffa di FRP.

$f_{ubk}$  è il valore caratteristico della resistenza della staffa che rientra tra le caratteristiche obbligatorie per la qualificazione delle staffe di FRP (Tabella 3-1) e che deve risultare maggiore del 40% della resistenza caratteristica a trazione della parte dritta della staffa,  $f_{fk,st}$  (Tabella 11-1, Appendice A). Se il processo produttivo della barra piegata è lo stesso della barra dritta,  $f_{ubk}$  deve risultare maggiore del 40% della resistenza caratteristica a trazione della barra dritta,  $f_{fk0}$ .

Qualora il valore  $f_{ubk}$  sia noto, sulla base di qualificazione eseguita dal Fabbrikante secondo EAD-barre FRP o LG-barre FRP, esso può essere utilizzato nella (6.14); in alternativa, il valore  $f_{ubk}$  potrà essere assunto pari al 40% della resistenza caratteristica associata alla classe scelta per la staffa secondo la Tabella 3-3 (si veda punto (4) del §3.3).

Qualora sia disponibile il fattore di riduzione  $\chi$  della  $f_{ubk}$  dopo esposizione in ambiente alcalino per 3000 ore a  $60^\circ$  in assenza di carico sostenuto (paragrafo 2.2.15 dell'EAD-barre FRP), in caso di esposizione ad ambiente aggressivo in cui non si possa escludere l'effetto della variazione di temperatura indotta dall'irraggiamento solare, si può assumere, nella (6.14),  $\eta_a \cdot \eta_T = \chi$ .

In caso di progettazione di elementi per azioni sismiche,  $f_{ubd} \leq 0.005 \cdot E_f$ .

(4) Il contributo relativo ai meccanismi resistenti del calcestruzzo,  $V_{Rd,ct}$ , da introdurre nella (6.12) è dato dalla (6.11a) o dalla (6.11c).

(5) La resistenza di progetto relativa alla crisi del calcestruzzo d'anima,  $V_{Rd,c}$ , si calcola con:

$$V_{Rd,c} = 0.9b \cdot d \cdot \alpha_c \cdot v \cdot f_{cd} \frac{\cot \theta}{(1 + \cot^2 \theta)} \quad (6.15)$$

in cui per la determinazione di  $\theta$  vale quanto detto al punto (3).

Inoltre, nella (6.15),  $v$  è un coefficiente riduttivo da assumersi pari a 0.5 e  $\alpha_c$  è un coefficiente che tiene conto dell'effetto della presenza di compressione nella sezione e si può valutare come segue:

$$\alpha_c = 1 \quad \text{per elementi non compressi}$$

$$\alpha_c = 1 + \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_{cd}} \quad \text{per } 0 \leq \sigma_{cp} \leq 0.25 \sigma_{cd}$$

$$\alpha_c = 1.25 \quad \text{per } 0.25 \sigma_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq 0.50 \sigma_{cd}$$

$$\alpha_c = 2.5 \left( 1 - \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_{cd}} \right) \quad \text{per } 0.50 \sigma_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq \sigma_{cd}$$

(6) Le armature longitudinali devono essere dimensionate traslando orizzontalmente il diagramma dei momenti flettenti della quantità:

$$a_1 = \frac{0.9d \cdot \cot \theta}{2} \quad (6.16)$$

in cui per la determinazione di  $\theta$  vale quanto detto al punto (3).

### 6.3.3 Elementi con armatura trasversale a taglio ibrida

(1) Per gli elementi strutturali dotati di armatura trasversale a taglio ibrida costituita da un doppio registro di staffe (staffe interne in acciaio e staffe più esterne in GFRP), la resistenza a taglio allo SLU può essere determinata in accordo alla (6.12), trascurando il contributo delle staffe in acciaio. In mancanza di dati sperimentali e di analisi numeriche in grado di chiarire con precisione la capacità resistente di questa configurazione, si suggerisce, infatti, di considerare nullo l'apporto delle staffe in acciaio e di assumere come resistenti esclusivamente il calcestruzzo e le staffe di FRP.

(2) Il contributo del calcestruzzo d'anima,  $V_{Rd,c}$ , può essere calcolato tramite la (6.15), riferendosi all'intera sezione di calcestruzzo.

(3) Il contributo delle staffe di FRP,  $V_{Rd,f}$ , può essere calcolato tramite la (6.13).

(4) Il contributo relativo ai meccanismi resistenti del calcestruzzo,  $V_{Rd,ct}$ , è dato dalla (6.11a) o dalla (6.11c).

### 6.3.4 Progetto a taglio sotto azioni da incendio

In condizioni di incendio, il contributo dell'armatura di FRP sia longitudinale che trasversale va trascurato quando la valutazione delle temperature nell'elemento strutturale indica il superamento del valore della  $T_g$ ; ciò significa che la resistenza a taglio è data dalla (6.11b) in caso di elementi senza armatura a taglio, mentre per elementi con armatura a taglio è data dalla (6.12), in cui si assume  $V_{Rd,f} = 0$  e  $V_{Rd,ct}$  dato dalla (6.11b). Le parti in calcestruzzo che superano i 500°C non devono essere considerate; per considerare il solo contributo efficace del calcestruzzo con temperature inferiori a 500°C si riducono opportunamente i valori di  $b$  e  $d$  tenendo conto del campo di temperature valutato nell'elemento strutturale mediante analisi termica.

## 6.4 VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ RESISTENTE A TORSIONE

(1) Per il calcolo della capacità resistente a torsione in elementi di calcestruzzo armati con barre e staffe di FRP, in assenza di specifiche indicazioni, è possibile utilizzare le formulazioni fornite dalla Normativa vigente o da documenti di comprovata validità per gli elementi di calcestruzzo armati con barre e staffe di acciaio, sotto le seguenti assunzioni:

- le aree di barre longitudinali e staffe di acciaio sono sostituite dalle aree nominali delle barre longitudinali e delle staffe di FRP;
- la tensione di snervamento delle armature longitudinali in acciaio è sostituita dalla resistenza a trazione di progetto delle barre di FRP,  $f_{\text{fd}}$ ;
- la tensione di snervamento delle staffe in acciaio è sostituita dalla resistenza di progetto a trazione della parte piegata delle staffe di FRP,  $f_{\text{ubd}}$ , dovendo essere  $f_{\text{ubd}} \leq 0.005 \cdot E_f$  in caso di progettazione di elementi per azioni sismiche.
- $\cot \theta = 1$ ;
- $\nu = 0.35$ .

## 6.5 CONFINAMENTO

(1) Alcune ricerche sperimentali hanno evidenziato che la resistenza a compressione delle barre di FRP è significativamente inferiore rispetto alla resistenza a trazione delle stesse barre a causa dell'insorgere di fenomeni di instabilità più significativi rispetto a quelli osservati nelle barre di acciaio, a causa dei minori valori dei moduli elastici delle barre di FRP. Pertanto, sebbene siano necessarie ancora ulteriori ricerche per confermare i dati sperimentali, il contributo delle barre di FRP nei riguardi dei carichi di compressione deve essere trascurato. È necessario, tuttavia, prevedere il confinamento delle barre di FRP compresse per prevenirne l'instabilità. Il confinamento di elementi di c.a. armati con barre di FRP soggette a compressione può essere realizzato tramite armatura trasversale di FRP, in forma di staffe, disposte perpendicolarmente all'asse dell'elemento e con un passo  $s$  che rispetti la seguente limitazione:

$$s \leq \min(d_{\text{min}}, 16d_b, 48d_{\text{bs}}) \quad (6.17)$$

essendo  $d_{\text{min}}$  la dimensione trasversale minima della sezione,  $d_b$  il diametro nominale delle barre longitudinali e  $d_{\text{bs}}$  il diametro nominale delle staffe di FRP.

(2) Oltre ad evitare l'instabilità delle barre di FPR compresse, un adeguato confinamento degli elementi di c.a. può determinare anche un miglioramento delle prestazioni dell'elemento strutturale, consentendo di incrementare:

- la resistenza ultima di elementi sollecitati da sforzo normale centrato o con piccola eccentricità;
- la deformazione ultima del calcestruzzo compresso in elementi pressoinflessi, sollecitati da sforzo normale con grande eccentricità.

(3) Il comportamento elastico delle barre di FRP fornisce una pressione di confinamento crescente con la sollecitazione assiale. All'aumentare della deformazione assiale del calcestruzzo sotto carico assiale, la tensione di confinamento continua ad aumentare con l'espansione del calcestruzzo fino alla rottura delle barre di FRP a causa del loro comportamento lineare elasto-fragile. Il livello di tensione nelle staffe di FRP dovrebbe, inoltre, essere limitato per mantenere l'integrità del calcestruzzo per le verifiche a taglio e per evitare la crisi delle staffe di FRP che in genere avviene nella piegatura (si veda § 6.3.2). Il valore di progetto della tensione di trazione  $f_{\text{ubk}}$  (valore caratteristico della resistenza a trazione della parte piegata delle staffe di FRP) da usarsi nelle staffe di FRP ai fini del confinamento è, pertanto, pari a:

$$f_{ubd} = \eta_T \cdot \eta_a \frac{f_{ubk}}{\gamma_f} \leq 0.004 \cdot E_f \quad (6.18)$$

essendo  $\gamma_f$  il fattore parziale di sicurezza delle barre di FRP da assumersi pari a 1.25,  $\eta_T$  e  $\eta_a$  i coefficienti di conversione che tengono conto di effetti della temperatura e delle condizioni ambientali, come definiti nel §4.7,  $E_f$  il valore medio del modulo elastico della staffa di FRP.

Qualora sia disponibile il fattore di riduzione  $\chi$  della  $f_{ubk}$  dopo esposizione in ambiente alcalino per 3000 ore a 60° in assenza di carico sostenuto (paragrafo 2.2.15 dell'EAD-barre FRP), in caso di esposizione ad ambiente aggressivo in cui non si possa escludere l'effetto della variazione di temperatura indotta dall'irraggiamento solare, si può assumere nella (6.18),  $\eta_a \cdot \eta_T = \chi$ .

(4) In mancanza di formulazioni specifiche per il confinamento con staffe di FRP, è possibile utilizzare formule di comprovata validità o fornite dalla Normativa vigente relative ad elementi confinati con staffe in acciaio. Il contributo delle staffe di FRP può essere assunto analogo a quello delle staffe in acciaio, adottando al posto della tensione di snervamento dell'acciaio la tensione massima data dall'equazione (6.18).

## 6.6 CALCOLO DEL MOMENTO RESISTENTE DI PROGETTO ALLO SLU IN PRESENZA DI ARMATURE IBRIDE

### 6.6.1 Fondamenti del calcolo

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

- raggiungimento della deformazione ultima nel calcestruzzo compresso,  $\epsilon_{cu}$ ;
- raggiungimento della deformazione ultima a trazione nelle barre di FRP,  $\epsilon_{fd}$ , come definita dalla (6.2).

(2) Per i legami costitutivi dei materiali valgono le assunzioni fatte nel § 6.1.1 per sezioni armate con sole barre di FRP. Per le armature in acciaio vale il legame costitutivo fornito dalla Normativa vigente.

### 6.6.2 Valutazione del momento resistente di progetto

(1) La valutazione del momento resistente di progetto della sezione si effettua in conformità con le ipotesi riportate nel § 6.1.1.

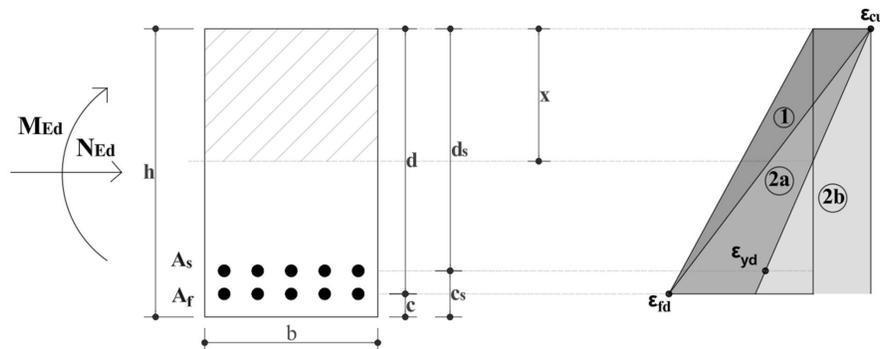


Figura 6-2 - Modalità di rottura di una sezione di calcestruzzo armato con armature ibride acciaio-FRP.

(2) Con riferimento alla Figura 6-2, si possono distinguere tre campi in cui può variare la retta delle deformazioni a rottura, a seconda che si raggiunga:

- la deformazione ultima nell'armatura di FRP tesa (campo 1) con il superamento della deformazione di snervamento nelle barre tese in acciaio;
- la deformazione ultima nel calcestruzzo compresso con il superamento della deformazione di snervamento nelle barre tese in acciaio (campo 2a);
- la deformazione ultima nel calcestruzzo compresso con le barre tese in acciaio in campo elastico (campo 2b).

(3) Nel campo 1, la rottura si attinge sempre per raggiungimento della deformazione ultima nelle barre tese di FRP, le armature tese in acciaio risultano snervate ed il calcestruzzo non raggiunge la sua deformazione ultima di progetto:  $\varepsilon_f = \varepsilon_{fd}$ ,  $\varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd}$ ,  $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$ .

Le deformazioni  $\varepsilon_c$  e  $\varepsilon_s$  possono essere, quindi, calcolate in funzione della deformazione di progetto delle barre di FRP sulla base della linearità del diagramma delle deformazioni sulla sezione tramite le seguenti relazioni:

$$\text{- calcestruzzo compresso: } \varepsilon_c = \frac{x}{d-x} \varepsilon_{fd} \quad (6.19)$$

$$\text{- barre tese di acciaio: } \varepsilon_s = \frac{d_s - x}{d - x} \varepsilon_{fd} \quad (6.20)$$

dove  $d$  è la distanza dal lembo compresso al baricentro delle armature di FRP e  $d_s$  la distanza dal lembo compresso al baricentro delle armature di acciaio.

In tale campo di rottura, la tensione nell'armatura tesa di acciaio è pari alla tensione di snervamento  $f_{yd}$ .

(4) Nel campo 2a, la rottura avviene sempre per schiacciamento del calcestruzzo, mentre le barre tese di FRP non raggiungono la loro deformazione ultima e le armature tese in acciaio risultano snervate:  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ ,  $\varepsilon_f < \varepsilon_{fd}$ ,  $\varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd}$

Le deformazioni  $\varepsilon_f$  e  $\varepsilon_s$  possono essere, quindi, calcolate in funzione della deformazione ultima del calcestruzzo sulla base della linearità del diagramma tramite le seguenti relazioni:

$$\text{- armatura tesa di FRP: } \varepsilon_f = \frac{d-x}{x} \varepsilon_{cu} \quad (6.21)$$

$$\text{- armatura tesa di acciaio: } \varepsilon_s = \frac{d_s - x}{x} \varepsilon_{cu} \quad (6.22)$$

In tale campo di rottura, la tensione nell'armatura tesa di acciaio è pari alla tensione di snervamento  $f_{yd}$ .

(5) Nel campo 2b, la rottura avviene sempre per schiacciamento del calcestruzzo, mentre l'armatura tesa di FRP non raggiunge la sua deformazione ultima e le armature tese in acciaio risultano in campo elastico:  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ ,  $\varepsilon_f < \varepsilon_{fd}$ ,  $\varepsilon_s < \varepsilon_{yd}$ .

Le deformazioni  $\varepsilon_f$  e  $\varepsilon_s$  possono essere, quindi, calcolate in funzione della deformazione ultima del calcestruzzo sulla base della linearità del diagramma tramite delle seguenti relazioni:

$$\text{- armatura tesa di FRP: } \varepsilon_f = \frac{d-x}{x} \varepsilon_{cu} \quad (6.23)$$

$$\text{- armatura tesa di acciaio: } \varepsilon_s = \frac{d_s - x}{x} \varepsilon_{cu} \quad (6.24)$$

In tale campo di rottura, la tensione nell'armatura tesa di acciaio si può calcolare moltiplicando la deformazione data dalla (6.24) per il modulo elastico dell'acciaio,  $E_s$ .

(5) Per tutte le tipologie di rottura (zona 1, zona 2a e 2b), la distanza dell'asse neutro,  $x$ , dal lembo compresso è determinata per mezzo dell'equazione di equilibrio alla traslazione:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} - A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f - A_s \cdot \sigma_s = N_{sd} \quad (6.25)$$

in cui in caso di flessione semplice si assumerà  $N_{sd}=0$ .

Il momento resistente,  $M_{Rd}$ , può essere ricavato dall'equazione di equilibrio alla rotazione rispetto al baricentro geometrico della sezione in calcestruzzo:

$$M_{Rd} = \psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (0.5h - \lambda \cdot x) + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot (0.5h - c) + A_s \cdot \sigma_s \cdot (0.5h - c_s) \quad (6.26)$$

Con riferimento al caso di sezione rettangolare riportato in Figura 6-2,  $A_f$  è l'area complessiva e modulo elastico delle barre tese di FRP,  $A_s$  è l'area complessiva delle barre tese di acciaio,  $x$  è la distanza dell'asse neutro dal bordo compresso della sezione di calcestruzzo,  $c$  e  $c_s$  sono le distanze dei baricentri delle barre di FRP e di acciaio dal bordo teso della sezione, rispettivamente. Per i coefficienti  $\psi$  e  $\lambda$  vale quanto già riportato nel 6.1.2 per gli elementi con sole armature di FRP.

Nelle (6.25) e (6.26)  $\sigma_s$  è la tensione nelle barre di acciaio che, in caso di campo di rottura 1 e 2a, può essere assunta pari alla tensione di snervamento,  $\sigma_s = f_{yd}$ , mentre nel caso di campo di rottura 2b deve essere valutata in campo elastico come  $\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s$ , in cui  $\varepsilon_s$  è da valutarsi con la (6.24).

## 6.7 COMPORTAMENTO DELLE STRUTTURE IPERSTATICHE

(1) Nel caso di strutture isostatiche la distribuzione delle azioni interne è regolata dalle sole equazioni di equilibrio.

(2) Nel caso di strutture iperstatiche, le sollecitazioni dipendono dalle caratteristiche di rigidità delle sezioni, per il tramite dei diagrammi momento-curvatura delle stesse. Le barre di FRP hanno un comportamento elasto-fragile, sicché il diagramma momento-curvatura di una sezione in c.a. armata con tali barre è monotono crescente e non si discosta molto da un andamento lineare fino a rottura. Di conseguenza, elementi strutturali siffatti hanno scarsa duttilità (limitata al comportamento non lineare del calcestruzzo), il che non permette fenomeni di redistribuzione delle azioni applicate. Pertanto:

- è possibile svolgere un'analisi strutturale di tipo elastico lineare;
- alle strutture iperstatiche non si possono applicare i teoremi dell'analisi limite;
- non sono validi i corollari dei teoremi fondamentali dell'analisi limite, ovvero:
  - a. eventuali distorsioni presenti sulla struttura (ad esempio variazioni termiche) possono influire sulla capacità resistente;
  - b. le proprietà elastiche della struttura hanno influenza sulla capacità resistente;
  - c. la capacità resistente di una struttura iperstatica può diminuire quando in qualche parte della struttura si aumenta la resistenza.

## 6.8 PARTICOLARI COSTRUTTIVI

### 6.8.1 Limitazioni sul copriferro

(1) I valori elevati delle dilatazioni termiche trasversali rispetto al calcestruzzo, unitamente all'effetto Poisson nel caso di armature compresse, possono mobilitare notevoli tensioni circonferenziali di trazione nel calcestruzzo nell'intorno della barra ed innescare fessure in direzione radiale (Figura 6-3). Queste ultime possono danneggiare l'aderenza all'interfaccia calcestruzzo-barra di FRP, con conseguenze negative sia sul comportamento strutturale in condizioni di esercizio ed ultime, sia sulla durabilità della struttura.

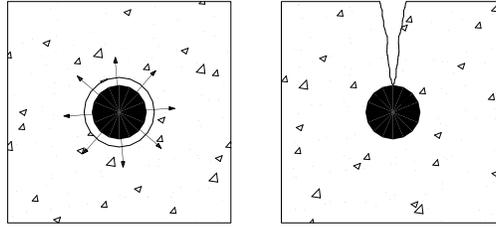


Figura 6-3 – Fessurazione indotta dalle tensioni normali nel calcestruzzo nell’intorno della barra.

(2) Per evitare la formazione di fessure in direzione radiale alle barre si suggerisce di adottare un copriferro geometrico (distanza del bordo inferiore della barra dal bordo teso) adeguato, il cui valore minimo è dato dalla seguente relazione:

$$c = c_{\min,b} + \Delta c_{\text{dev}} \quad (6.27)$$

In cui:

- $c_{\min,b} = \max(1.5d_b, 10\text{mm})$  in assenza di specifiche prove sperimentali, essendo  $d_b$  il diametro nominale della barra di FRP;
- $\Delta c_{\text{dev}}$  è l’incremento di copriferro legato alla tolleranza di esecuzione, definito in accordo con EC2 (EN 1992-1-1).

### 6.8.2 Limitazioni sulle armature longitudinali

(1) Il minimo diametro nominale che si può utilizzare per le barre di FRP come armature longitudinali è  $d_b = 8 \text{ mm}$ .

(2) L’area delle armature tese longitudinali di FRP non deve essere inferiore ad un valore minimo, in grado di garantire soddisfacimento della seguente condizione:

$$M_{\text{Rd}} = 1.5 \cdot M_{\text{cr}} \quad (6.28)$$

dove  $M_{\text{cr}}$  rappresenta il momento di prima fessurazione, da determinarsi in accordo con la Normativa vigente. La (6.28) può essere riscritta in maniera equivalente come segue:

$$A_{\text{f,min}} = 0.34 \cdot \frac{b \cdot d \cdot f_{\text{ctm}}}{f_{\text{fd}}} \quad (6.29)$$

(3) L’armatura minima a compressione raccomandata è:

$$A_{\text{f,min}} = 0.001 \cdot A_c \quad (6.30)$$

(4) Per elementi non armati a taglio, deve essere prevista un’armatura tesa longitudinale  $A_f$  pari a:

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} \geq 0.01 \quad (6.31)$$

(5) La sovrapposizione delle barre di FRP in trazione deve essere realizzata nelle zone dove la tensione di lavoro nelle barre è minore dell’80% della resistenza di progetto valutata allo SLU,  $f_{\text{fd}}$ . La lunghezza minima di sovrapposizione,  $\ell_s$ , deve essere pari a:

$$\ell_s = 1.25 \cdot \ell_{\text{ad}} \quad (6.32)$$

essendo la  $\ell_{\text{ad}}$  data dalla (5.3).

### 6.8.2.1 Prescrizioni per pilastri

(1) La minima armatura longitudinale in trazione nei pilastri soggetti a presso-flessione deve essere pari a:

$$A_f = \max \left( 0.01 \cdot \frac{N_{ed}}{f_{fd}}; 0.01 \cdot A_c \right) \quad (6.33)$$

(2) La massima armatura longitudinale in trazione per i pilastri deve essere pari a:

$$- A_f = 0.04 \cdot A_c \text{ nelle zone senza sovrapposizione} \quad (6.34a)$$

$$- A_f = 0.08 \cdot A_c \text{ nelle zone con sovrapposizione} \quad (6.34b)$$

(3) Le armature longitudinali nei pilastri devono rispettare le ulteriori seguenti limitazioni:

- almeno una barra in ogni angolo per sezioni poligonali e sei per sezioni circolari;
- le armature devono essere simmetriche;
- nelle sezioni poligonali tutte le barre devono essere trattenute da spilli e posizionate a una distanza massima di 150 mm.

### 6.8.2.2 Prescrizioni per solette

(1) Per solette in calcestruzzo armate con barre di FRP, l'armatura minima raccomandata nelle due direzioni è la seguente:

$$A_{f,\min} = 0.0025 \cdot A_c \quad (6.35)$$

(2) 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.

### 6.8.3 Limitazioni sulle armature trasversali

(1) Per travi e pilastri, il diametro minimo delle staffe,  $d_{bs}$ , deve essere il massimo tra 6 mm e un quarto del diametro nominale  $d_b$  delle barre longitudinali.

#### 6.8.3.1 Prescrizioni per le travi

(1) La percentuale minima di armatura trasversale deve essere:

$$\rho_{s,\min} = \frac{0.08 \sqrt{f_{ck}}}{\varepsilon_{fd} \cdot E_f} \quad (6.36)$$

Occorre, inoltre, prevedere almeno tre staffe al metro e, comunque, il passo  $s$  deve rispettare la seguente limitazione:

$$s \leq 0.75d \cdot (1 + \cot \alpha) \quad (6.37)$$

essendo  $d$  l'altezza utile della sezione e  $\alpha$  l'inclinazione delle staffe.

(2) Nelle zone di appoggio ed in corrispondenza di carichi concentrati, per un tratto pari all'altezza utile  $d$  della sezione trasversale, il passo delle staffe deve soddisfare la seguente limitazione:

$$s \leq \min\left(\frac{d}{4}; 12d_{b,\min}; 150\text{mm}\right) \quad (6.38)$$

essendo  $d_{b,\min}$  il diametro minimo delle barre longitudinali.

### 6.8.3.2 Prescrizioni per i pilastri

(1) Nei pilastri il passo  $s$  tra le staffe deve rispettare la seguente limitazione:

$$s \leq \min(15d_{b,\min}; 250\text{mm}) \quad (6.39)$$

(2) Il passo tra le staffe deve essere opportunamente infittito 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 450 mm.

In corrispondenza dei suddetti tratti, il passo delle staffe deve soddisfare la seguente limitazione:

$$s \leq \min\left(\frac{l_{\min}}{4}; 100\text{mm}\right) \quad (6.40)$$

essendo  $l_{\min}$  il lato minore della sezione trasversale.

### 6.8.4 Ulteriori dettagli costruttivi

(1) Per le barre piegate, per evitare il danneggiamento delle fibre della barra di FRP, il diametro minimo del mandrino,  $d_m$ , per realizzare la piegatura in stabilimento ( $d_m = 2r_t$ , essendo  $r_t$  il raggio di curvatura della barra) deve essere 7 volte il diametro nominale della barra,  $d_b$ , per diametri maggiori di 16 mm, e pari a 4 volte  $d_b$ , per diametri minori di 16 mm. Il Fabbricante deve specificare il diametro del mandrino utilizzato per la piegatura (si veda Appendice A).

(2) La tensione di progetto nella barra piegata di FRP deve essere inferiore a  $25 \cdot f_{cd}$ , essendo  $f_{cd}$  la resistenza a compressione di progetto del calcestruzzo, al fine di evitare il danneggiamento del calcestruzzo nell'intorno della piegatura.

(3) I valori minimi delle lunghezze di ancoraggio per le barre di FRP sono riportati nel § 5.4.

### Bibliografia essenziale

1. CEN (2023), Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. EN 1992-1-1:2004.

## 7 ANALISI DEL COMPORTAMENTO AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO

### 7.1 FONDAMENTI DEL CALCOLO

(1) Gli elementi strutturali devono essere verificati anche nei riguardi degli stati limite di esercizio (SLE), i più rilevanti dei quali sono quelli relativi:

- alla limitazione delle tensioni nei materiali (calcestruzzo in zona compressa e armature di FRP in trazione);
- al controllo delle deformazioni (limitazione delle frecce);
- al controllo della fessurazione (limitazione dell'apertura delle fessure).

Stante il basso modulo elastico, le verifiche agli SLE possono essere rilevanti per il dimensionamento degli elementi strutturali con barre di FRP in fibra di vetro.

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

(2) Le combinazioni delle azioni nei riguardi delle quali devono essere condotte le verifiche in esercizio sono definite dalla Normativa vigente. Sono in particolare definite le seguenti combinazioni delle azioni per le verifiche agli SLE:

- Combinazione rara (o caratteristica), generalmente impiegata per gli SLE irreversibili e corrispondente ad avere una probabilità del 5% che il carico venga superato durante la vita dell'opera;
- Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli SLE reversibili e corrispondente ad un carico che è superato per il 5% della vita utile dell'opera;
- Combinazione quasi-permanente, generalmente impiegata per gli SLE relativi ad azioni che hanno effetti a lungo termine e corrispondente ad un carico che è superato per il 50% della vita utile dell'opera.

(3) Sotto le varie combinazioni di carichi in esercizio, è necessario verificare che:

- i livelli tensionali nei materiali siano opportunamente limitati allo scopo di evitare comportamenti non lineari dei materiali, sia delle barre di FRP che del calcestruzzo, sia nei riguardi della combinazione caratteristica e che della combinazione quasi-permanente delle azioni. In particolare, sotto azioni quasi-permanenti, le tensioni dovute a carichi prolungati nel tempo devono essere limitate al fine di mitigare i fenomeni di viscosità nel calcestruzzo e di fatica statica nelle barre di FRP, che possono indurre una riduzione della resistenza delle barre;
- le deformazioni della struttura, e in particolare le frecce degli elementi inflessi, non attingano valori eccessivi, tali cioè da inficiare il normale uso della struttura, produrre danni ad elementi non strutturali, arrecare disturbo psicologico agli utenti. I valori limite del rapporto freccia/luce possono essere diversi in funzione della tipologia strutturale e della destinazione d'uso e, in funzione dei casi, possono riguardare la freccia totale o quella dovuta alla sola componente variabile delle azioni. Stante il valore ridotto del modulo elastico delle barre di FRP, in particolare delle barre in fibra di vetro, la verifica di deformazione potrebbe determinare il quantitativo minimo di armatura di FRP necessario per soddisfare tutte le verifiche agli SLE;
- i fenomeni fessurativi risultino opportunamente contenuti, dal momento che fessure troppo numerose o di ampiezza eccessiva potrebbero ridurre notevolmente la durabilità delle strutture, la loro funzionalità, il loro aspetto, oltre a danneggiare l'integrità del legame di aderenza all'interfaccia barra di FRP-calcestruzzo. Poiché le armature di FRP sono meno suscettibili al degrado rispetto alle armature metalliche, i limiti accettabili di fessurazioni possono essere meno stringenti rispetto alle strutture tradizionali.

(4) Le verifiche in condizioni di esercizio possono essere svolte in campo elastico lineare tenendo conto del comportamento per sezione interamente reagente o per sezione fessurata, qualora la tensione nel calcestruzzo teso nella combinazione di carico adottata per la verifica sia inferiore o superiore alla sua resistenza a trazione.

Le ipotesi alla base del calcolo sono:

- conservazione delle sezioni piane, con diagramma lineare delle deformazioni normali nel calcestruzzo compresso e nelle barre di FRP tese;
- comportamento elastico lineare a compressione del calcestruzzo;
- limitata capacità del calcestruzzo di resistere a sforzi di trazione, eventualmente tenendo conto dell'effetto di *tension stiffening* nei conci tra sezioni fessurate;
- comportamento elastico lineare delle barre di FRP;
- trascurabilità del contributo delle barre compresse di FRP.

Le suddette ipotesi consentono di definire un rapporto di proporzionalità tra i moduli elastici delle barre di FRP ed il calcestruzzo, detto coefficiente di omogeneizzazione,  $\alpha_f = \frac{E_f}{E_c}$ , e di utilizzare, in

condizioni di esercizio, le formule per il calcolo delle tensioni per materiali a comportamento elastico lineare introducendo l'area delle armature di FRP, opportunamente omogeneizzata attraverso  $\alpha_f$ , nel calcolo dell'inerzia e dell'asse neutro. In ogni caso, il contributo delle armature di FRP in zona compressa viene trascurato ed è consentito non detrarre l'area di calcestruzzo ad esse corrispondente.

(5) Nel caso di azioni di lunga durata (frequenti o quasi-permanenti), il valore del coefficiente di omogeneizzazione  $\alpha_f$  deve tenere in conto l'evoluzione delle deformazioni differite nel calcestruzzo. Nel calcolo delle tensioni e delle frecce, 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.

(6) Per effettuare le verifiche in condizioni di esercizio è necessario considerare che l'elemento strutturale può avere porzioni nelle quali la tensione di trazione nel calcestruzzo è inferiore alla resistenza a trazione, per cui l'elemento non è fessurato, e porzioni nelle quali il superamento della resistenza a trazione nel calcestruzzo teso comporta la formazione di fessure trasversali, ad una certa spaziatura. Nel caso di presenza di porzioni fessurate, è possibile utilizzare opportuni modelli di "*tension-stiffening*" (si vedano §7.3 e §7.4).

## 7.2 STATO LIMITE DI LIMITAZIONE DELLE TENSIONI

(1) Per la combinazione di carico quasi permanente, la tensione nelle barre di FRP deve soddisfare la seguente limitazione:

$$\sigma_f \leq \eta_T \cdot \eta_a \cdot \eta_c \cdot \frac{f_{ftk0}}{\gamma_f} \quad (7.1)$$

essendo  $f_{ftk0}$  il valore caratteristico della resistenza a trazione delle barre di FRP,  $\eta_T$ ,  $\eta_a$  e  $\eta_c$  i coefficienti di conversione definiti nel § 4.7 e nella Tabelle 4-1 e 4-3, ed infine  $\gamma_f$  il fattore parziale del materiale FRP che per verifiche allo stato limite di esercizio si assume pari a 1.0.

Qualora sia disponibile il valore caratteristico della resistenza a trazione per fatica statica a 100 anni,  $f_{ftk,c}$ , la (7.1) diventa  $\sigma_f \leq \eta_T \cdot \eta_a \cdot \frac{f_{ftk,c}}{\gamma_f}$ , in cui si è assunto  $f_{ftk,c} = \eta_c \cdot f_{ftk0}$ .

Qualora sia disponibile il valore caratteristico della resistenza a trazione per fatica statica a 100 anni in condizioni di esposizione ad ambiente alcalino e per  $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $f_{\text{ftk,ca}}$  (Appendice A) in caso di esposizione ad ambiente aggressivo ed in cui non si possa escludere l'effetto della variazione di temperatura indotta dall'irraggiamento solare, la (7.1) diventa  $\sigma_f \leq \frac{f_{\text{ftk,ca}}}{\gamma_f}$ , in cui si è assunto

$$f_{\text{ftk,ca}} = \eta_T \cdot \eta_a \cdot \eta_{\text{ca}} \cdot f_{\text{ftk0}}$$

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

(2) Per la combinazione di carico caratteristica (rara), la tensione nelle barre di FRP deve soddisfare la seguente limitazione:

$$\sigma_f \leq \eta_T \cdot \eta_a \cdot 0.8 \cdot \frac{f_{\text{ftk0}}}{\gamma_f} \quad (7.2)$$

essendo  $f_{\text{ftk0}}$  il valore caratteristico della resistenza a trazione delle barre in FPR,  $\eta_T$  e  $\eta_a$  i coefficienti di conversione definiti nel § 4.7 (Tabelle 4-1 e 4-3).

La percentuale di riduzione della resistenza a trazione media dopo esposizione in ambiente alcalino (resistenza a trazione ottenuta dopo un'esposizione ad ambiente alcalino per 3000 ore a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),  $R_{\text{ct,t}}^{3000}$ , (Tabella 3-1 e Appendice A) può essere utilizzata nella (7.2) come sostitutiva del prodotto  $\eta_T \cdot \eta_a$  in caso di esposizione in ambiente aggressivo ed in cui non si possa escludere l'effetto della variazione di temperatura indotta dall'esposizione all'irraggiamento solare.

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

(3) Nel caso di elementi soggetti a flessione semplice, indicato con  $M$  il momento flettente dovuto ai carichi agenti nella combinazione agli SLE di verifica, le tensioni nei materiali possono essere calcolate con riferimento alla sezione fessurata come segue:

- tensioni nel calcestruzzo compresso:

$$\sigma_c = \frac{M}{I_2} x_2 \quad (7.3)$$

- tensioni nell'armatura di FRP tesa:

$$\sigma_f = \frac{\alpha_f \cdot M}{I_2} (d - x_2) \quad (7.4)$$

dove  $I_2$  è il momento di inerzia della sezione in c.a. in condizione fessurata in cui si trascura il contributo delle barre di FRP compresse, mentre le barre tese di FRP sono omogeneizzate attraverso il coefficiente  $\alpha_f$ ;  $x_2$  è la distanza dell'asse neutro della sezione fessurata dall'estremo lembo compresso della sezione e  $d$  è l'altezza utile della sezione.

Nel calcolo del coefficiente di omogeneizzazione,  $\alpha_f = \frac{E_f}{E_c}$ , il valore del modulo elastico del calce-

struzzo  $E_c$  va calcolato in funzione della combinazione di azioni in esercizio considerata per la verifica; esso può essere assunto pari ad un valore 'efficace' per tener conto dello sviluppo nel tempo di

deformazioni differite attraverso la relazione  $E_{\text{c,eff}} = \frac{E_c}{1 + \varphi(t, t_0)}$ , essendo  $\varphi(t, t_0)$  il coefficiente di

viscosità del calcestruzzo da definirsi in base alla Normativa vigente o ad indicazioni di comprovata

validità. Tale approccio non tiene conto di eventuali fenomeni di viscosità in campo lineare delle barre di FRP, solitamente molto inferiori a quelli del calcestruzzo.

In assenza di informazioni specifiche sulle condizioni che inducono fenomeni viscosi, per il calcolo di  $I_2$ ,  $x_2$  e delle tensioni, si può assumere in via semplificata  $\varphi(t, t_0) = 1$ .

### 7.3 STATO LIMITE DI DEFORMAZIONE

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

(2) Il modello adottato deve simulare il comportamento reale della struttura con un livello di accuratezza adeguato agli obiettivi del calcolo. Si deve tenere conto della maggiore deformabilità conseguente all'eventuale presenza di fessure nel calcestruzzo teso causate dal superamento della resistenza a trazione. In particolare, il modello meccanico adottato deve tenere conto:

- del diverso comportamento delle sezioni in fase non fessurata e fessurata;
- dell'effetto irrigidente del calcestruzzo teso tra le fessure (effetto “*tension stiffening*”) nei tratti dell'elemento dove presenti. Qualora tale contributo venga trascurato, la freccia che viene determinata sarà superiore e, quindi, il calcolo sarà a favore di sicurezza;
- dell'influenza di distorsioni eventualmente agenti, quali ad esempio quelle di origine termica,
- 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 nel calcestruzzo;
- della modalità di applicazione del carico, sia essa statica o ciclica.

(3) 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 caso di calcolo non lineare delle frecce, non vale il principio di sovrapposizione degli effetti.

(4) In alternativa, per travi in condizioni inflesse, sono possibili analisi semplificate del tipo di quelle in uso per le ordinarie travi in calcestruzzo armato con barre di acciaio. Interpretazioni di prove di laboratorio hanno confermato la validità, anche per travi con barre di FRP, del modello semplificato di *tension-stiffening* per il quale la freccia può essere espressa come combinazione della freccia di stadio 1 (trave non fessurata) e della freccia di stadio 2 (trave ovunque fessurata):

$$f = f_1 \cdot (1 - \gamma) + f_2 \cdot \gamma$$

$$\gamma = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^m \quad (7.5)$$

dove:

- $f$  è la freccia complessiva dell'elemento strutturale,
- $f_1$  è la freccia calcolata nell'ipotesi di trave non fessurata, con riferimento, quindi, all'inerzia  $I_1$  della sezione interamente reagente e con armatura tesa di FRP omogeneizzata attraverso  $\alpha_f$ ;
- $f_2$  è la freccia calcolata nell'ipotesi di trave ovunque fessurata, con riferimento, quindi, all'inerzia  $I_2$  della sezione fessurata e con armatura tesa di FRP omogeneizzata attraverso  $\alpha_f$ , già definita nel § 7.2;
- $\gamma$  è il coefficiente di *tension – stiffening*, in cui:
  - $M_{max}$  è il momento agente nella sezione più sollecitata dell'elemento, da valutarsi con rife-

rimento alla combinazione di carico caratteristica (in quanto fornisce il massimo momento che è stato presente nell'elemento in condizioni di esercizio durante la sua storia di carico),

-  $M_{cr}$  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, in assenza di indicazioni più specifiche;

-  $\beta_1$  è un coefficiente adimensionale che tiene conto della qualità dell'aderenza delle barre, da assumersi pari a 0.85 per barre con classe di aderenza 1 e 0.70 per barre con classe di aderenza 2, essendo le classi di aderenza definite nel § 5.3;

-  $\beta_2$  è un coefficiente dimensionale che tiene conto della durata dei carichi, pari a 1.0 per carichi di breve durata e 0.5 per carichi di lunga durata o ciclici. In caso di carichi di lunga durata, occorre tener conto dei fenomeni viscosi del calcestruzzo attraverso il modulo elastico efficace  $E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \varphi(t, t_0)}$ , definito in precedenza.

(5) I coefficienti  $m$  e  $\beta_1$  dipendono dall'aderenza tra le barre di FRP ed il calcestruzzo. Allo scopo di condurre una valutazione più accurata della deformabilità delle travi, aspetto che potrebbe condizionare il quantitativo minimo di armatura di FRP necessario per soddisfare la verifica, si può procedere secondo quanto indicato nell'Appendice D per una calibrazione specifica dei due coefficienti.

#### 7.4 STATO LIMITE DI FESSURAZIONE

(1) Sebbene le barre di FRP presentino proprietà di durabilità nettamente superiori rispetto alle armature metalliche, è comunque opportuno prevedere limitazioni all'ampiezza delle fessure in esercizio, sia per proteggere le barre stesse, sia per aumentare la durabilità del calcestruzzo, sia per esigenze estetiche.

(2) Ai fini della verifica dell'apertura delle fessure per le strutture armate con barre di FRP, si deve verificare che l'ampiezza caratteristica delle fessure non sia superiore ai valori limite riportati nella Tabella 7-1.

**Tabella 7-1.** Valori limite dell'apertura delle fessure per elementi armati con barre di FRP per diverse condizioni di esposizione e combinazioni di carico

Condizione di esposizione	Classe di esposizione	Combinazione di carico SLE	$w_{max}$ [mm]
Interna	X0, XC1, XC2, XC3, XF1	Frequente	0.7
		Quasi permanente	0.6
Esterna	XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3	Frequente	0.6
		Quasi permanente	0.5
Ambiente aggressivo	XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4	Frequente	0.5
		Quasi permanente	0.4

(3) Per il calcolo dell'apertura delle fessure in elementi di calcestruzzo armato con barre di FRP, è possibile utilizzare l'approccio classico del Model Code, che rimuove l'ipotesi di uguaglianza delle deformazioni in zona tesa tra le armature di FRP ed il calcestruzzo posti alla stessa distanza dall'asse neutro, e prevede di calcolare la distanza massima tra le fessure,  $s_{r,max}$ , e la differenza tra le deformazioni medie che si sviluppano nell'armatura e nel calcestruzzo teso tra due fessure successive,  $(\epsilon_{fm} - \epsilon_{cm})$ . Ciò consente di considerare in maniera semplificata il fenomeno del tension-stiffening del calcestruzzo teso nell'intorno delle barre di FRP conseguente alle tensioni tangenziali di aderenza che sviluppano all'interfaccia barra-calcestruzzo.

Pertanto, in analogia con le formulazioni previste per gli elementi di c.a. con barre in acciaio, il va-

lore caratteristico dell'apertura delle fessure in un elemento in calcestruzzo armato con barre di FRP può calcolarsi come segue:

$$w_k = k_{1/r} \cdot s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm}) \quad (7.6)$$

dove:

-  $k_{1/r} = \frac{h - x_2}{d - x_2}$  è un fattore geometrico che tiene conto dell'effetto della curvatura della trave

sull'apertura delle fessure, essendo  $h$  l'altezza della sezione,  $d$  l'altezza utile e  $x_2$  la distanza dal lembo compresso dell'asse neutro della sezione fessurata;

-  $s_{r,max}$  è la distanza massima tra due fessure consecutive;

-  $\varepsilon_{fm}$  e  $\varepsilon_{cm}$  sono, rispettivamente, i valori medi delle deformazioni nelle barre di FRP e nel calcestruzzo teso tra due fessure successive.

Nella (7.6), la distanza massima tra le fessure  $s_{r,max}$  si può calcolare come:

$$s_{r,max} = \beta_w \cdot \left( k_c \cdot c_{geom} + k_{\phi/r} \cdot k_{\eta} \cdot k_b \cdot \frac{f_{ctm} \cdot d_b}{\tau_{bmf} \cdot \rho_{f,ef}} \right) \quad (7.7)$$

in cui:

-  $\beta_w$  è un coefficiente che determina il valore massimo della distanza tra le fessure a partire dal valore medio (corrispondente al termine riportato in parentesi) e che si può assumere pari a 1.7 in condizioni di fessurazione stabilizzata;

-  $k_c$  è un coefficiente di natura empirica da assumersi pari a 1.5;

-  $c_{geom}$  è il copriferro, inteso come la maggiore tra le distanze, valutate al netto del diametro, delle barre di FRP dal bordo inferiore e dal bordo laterale della sezione in calcestruzzo;

-  $k_{\phi/r}$  è un coefficiente che dipende dalla distribuzione delle tensioni tangenziali lungo le barre e, in ipotesi semplificativa di tensioni costanti nel tratto tra due fessure successive, si assume pari a 0.25;

-  $k_{\eta}$  è un fattore che tiene conto della distribuzione delle tensioni prima della fessurazione. Per sezioni rettangolari soggette a flessione, può essere calcolato come:  $k_{\eta} = \frac{h - h_{c,ef}}{h}$ , essendo

$h_{c,ef}$  l'altezza dell'area di calcestruzzo efficace in trazione definita nel seguito. Per sezioni soggette a trazione pura,  $k_{\eta}$  è pari a 1.00;

-  $k_b$  è un fattore che tiene conto dell'effetto della posizione delle barre di FRP durante il getto, da assumersi pari a 0.9 in caso di barre posizionate in basso (condizione di migliore aderenza che determina fessure più ravvicinate) e 1.2 in caso di rinforzo posizionate in alto (condizione di peggiore aderenza che determina fessure più distanziate);

-  $f_{ctm}$  è la resistenza media a trazione del calcestruzzo;

-  $d_b$  è il diametro delle barre di FRP. Nel caso di barre con diametri diversi, si definisce un diametro equivalente che, per  $n_1$  barre di diametro  $d_{b1}$  e  $n_2$  barre di diametro  $d_{b2}$  risulta pari a:

$$d_{b,eq} = \frac{n_1 d_{b1}^2 + n_2 d_{b2}^2}{n_1 d_{b1} + n_2 d_{b2}} \quad (7.8)$$

-  $\tau_{bmf}$  è la tensione media di aderenza agente all'interfaccia tra le barre di FRP ed il calcestruzzo, da calcolarsi come  $\tau_{bmf} = k_{bond} \cdot f_{ctm}$ , dove per fessurazione stabilizzata si assume  $k_{bond} = 1.50$  per barre di FRP con classe di aderenza 1, 1.25 per classe di aderenza 2. Valori diversi di  $k_{bond}$  possono essere stimati sulla base di confronti con dati sperimentali mediante le procedure di 'design by testing' indicate nell'Annex D di EN 1990.

-  $\rho_{f,ef}$  è la percentuale efficace di rinforzo, da calcolarsi come segue:

$$\rho_{f,ef} = \frac{A_f}{A_{c,ef}} \quad (7.9)$$

dove l'area di calcestruzzo efficace in trazione (Figura 7.1), per sezioni rettangolari o a T con anima tesa, è pari a:

$$A_{c,ef} = b \cdot h_{c,ef} \quad (7.10)$$

essendo  $b$  la larghezza della trave o dell'anima tesa, e  $h_{c,ef}$  l'altezza efficace, calcolata come segue:

- in presenza di un solo strato di barre tese (Figura 7.1a):

$$h_{c,ef} = \min\{c + 5d_b; 10d_b; 3.5c; h - x_2; h/2\} \quad (7.11)$$

- in presenza di  $n$  strati di barre tese e distanti in verticale  $\delta c$  (Figura 6.1b):

$$h_{c,ef} = \min\{\min(c + 5d_b; 10d_b; 3.5c) + (n-1)\delta c; h - x_2; h/2\} \quad (7.12)$$

essendo  $c$  la distanza del baricentro delle barre di FRP dal bordo teso della sezione (copriferro meccanico).

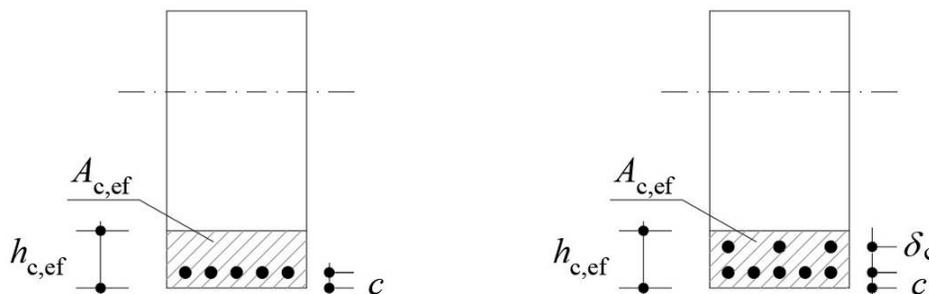


Figura 7-1. Definizione dell'area di calcestruzzo efficace in trazione: a) singolo strato di armature; b) più strati di armature.

(4) Nella (7.6), la differenza tra le deformazioni medie nell'armatura interna di FRP ed il calcestruzzo teso nel concio tra due fessure consecutive si può calcolare come segue:

$$\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm} = \left( \frac{\sigma_f}{E_f} - k_t \frac{f_{ctm}}{E_f \cdot \rho_{f,ef}} + k_t \frac{f_{ctm}}{E_c} \right) \geq \frac{\sigma_f}{E_f} (1 - k_t) \quad (7.13)$$

in cui:

- $\sigma_f$  è la tensione agente nelle barre di FRP nella combinazione di azioni di verifica, da calcolarsi in ipotesi di sezione fessurata e secondo quanto riportato nel § 7.2;  $E_f$  è il modulo elastico delle barre di FRP;
- $E_c$  è il modulo elastico istantaneo del calcestruzzo;
- $k_t$  è un coefficiente che dipende dalla durata e dalla natura del carico applicato ed è pari a:
  - $k_t = 0.6$  per carichi di breve durata o per carichi istantanei;
  - $k_t = 0.4$  per carichi di lunga durata o per carichi ripetuti.

(5) In alternativa alle 7.6, 7.7 e 7.13, è possibile adottare modellazioni più complesse ed accurate, purché supportate da adeguate sperimentazioni.

## 7.5 VERIFICHE ALLO SLE IN PRESENZA DI ARMATURE IBRIDE

(1) Ai fini delle verifiche tensionali per gli elementi di calcestruzzo con armatura ibrida, valgono le ipotesi elencate ai punti (4) e (5) del § 7.1. Per il calcestruzzo e le armature metalliche valgono le

limitazioni indicate dalla normativa vigente per elementi di c.a., mentre per le armature di FRP valgono le limitazioni fornite dalle (7.1) e (7.2). Nel computo dell'inerzia della sezione e del corrispondente asse neutro, le armature metalliche, sia in zona tesa che in zona compressa, possono essere tenute in conto attraverso il coefficiente di omogeneizzazione  $\alpha_s = \frac{E_s}{E_c}$ , essendo  $E_s$  il modulo elasto-

statico delle armature metalliche, mentre le sole armature di FRP in zona tesa devono essere tenute in conto attraverso il coefficiente di omogeneizzazione  $\alpha_f$ , secondo quanto già descritto nel § 7.2.

(2) Ai fini della verifica delle frecce per gli elementi di calcestruzzo con armatura ibrida, a vantaggio di sicurezza ed in assenza di specifiche indicazioni normative di comprovata validità, è possibile utilizzare la (7.5) adottando per il coefficiente  $\beta_1$  il valore competente alla classe di aderenza delle barre di FRP, assimilando, quindi, ai fini del tension stiffening, il comportamento delle barre di acciaio a quelle di FRP.

(3) Ai fini della verifica dell'apertura delle fessure per gli elementi di calcestruzzo con armatura ibrida, se le armature di FRP e di acciaio sono poste alla stessa quota, l'ampiezza massima delle fessure deve rispettare gli stessi limiti indicati dalla Normativa vigente per gli elementi di calcestruzzo dotati di sole armature metalliche. Se, invece, le armature di acciaio sono posizionate ad una distanza dal bordo teso maggiore di quella delle barre di FRP, l'ampiezza massima delle fessure deve rispettare limitazioni intermedie tra quelle date dalla normativa vigente per gli elementi di calcestruzzo dotati di sole armature metalliche e quelle riportate al punto (2) del § 7.4 per elementi armati con sole barre di FRP, tenendo conto delle distanze dei due registri di armature dall'asse neutro della sezione calcolato in ipotesi di sezione fessurata.

Ai fini del calcolo dell'apertura massima delle fessure con la (7.6), in assenza di specifiche indicazioni di comprovata validità ed in considerazione del ridotto numero di dati sperimentali disponibili, è possibile utilizzare la (7.7) e la (7.13), in cui la percentuale di rinforzo può essere calcolata come segue:

$$\rho_{f,ef} = \frac{A_f + \xi_1 A_s}{A_{c,ef}} \quad \xi_1 = \frac{1.8}{k_{bond}} \cdot \frac{d_b}{d_s} \quad (7.14)$$

in cui  $d_b$  e  $d_s$  sono i diametri nominali delle barre di FRP e di acciaio, rispettivamente, e  $k_{bond}$  è stato definito in precedenza (pari a 1.50 o 1.25 in caso di barre di FRP di classe 1 o 2, rispettivamente).

In caso di barre di FRP e di acciaio con diametri diversi, si può utilizzare la (7.8) per il calcolo del diametro equivalente da inserire nella (7.7), nella quale il copriferro è calcolato con riferimento al registro di armatura più vicino al bordo teso della sezione.

Infine, nella (7.13), nel caso in cui le armature siano poste a quote diverse, il termine  $\frac{\sigma_f}{E_f}$  è riferito al registro di armature più vicine al bordo teso (quindi nelle barre di FRP); qualora, invece, le armature di FRP e di acciaio siano poste alla stessa quota, nella (7.13), il termine  $\frac{\sigma_f}{E_f}$  è da intendersi come la deformazione letta alla quota delle armature nelle consuete ipotesi di sezione fessurata e conservazione della sezione piana.

### Bibliografia essenziale

1. EN 1990:2021. European committee for standardization, (2021). Eurocode: basis of structural and geotechnical design.

## 8 PRESCRIZIONI IN ZONA SISMICA

### 8.1 PREMESSA

(1) La mancanza di duttilità e la ridotta capacità di dissipazione dell'energia rappresentano caratteristiche peculiari delle barre di FRP che devono essere attentamente considerate nelle situazioni in cui l'azione sismica può essere di rilievo. Ovviamente non è quindi possibile una diretta applicazione dei criteri di progettazione in zona sismica validi per le strutture in calcestruzzo armato con barre metalliche al caso di utilizzo di barre di FRP. Tuttavia, in molti casi è comunque possibile progettare senza richiedere duttilità alle armature, almeno per alcuni elementi strutturali. Vi sono poi molte applicazioni potenziali del calcestruzzo armato con barre di FRP nelle quali le verifiche di tipo statico sono più severe rispetto a quelle di tipo sismico, per le quali la progettazione può essere riconducibile a quella già affrontata nel Capitolo 6 delle presenti Istruzioni. Inoltre, vi sono ulteriori applicazioni nelle quali, in un'ottica di prefabbricazione della struttura, alcuni elementi che non fanno parte della struttura principale destinata a resistere alle azioni sismiche, possono essere progettati in calcestruzzo armato con barre di FRP.

(2) In generale, non si possono utilizzare elementi strutturali di calcestruzzo armato con barre di FRP, facenti parte della struttura principale destinata a resistere alle azioni sismiche, in zone ad alta sismicità, per le quali, allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita, il valore dell'accelerazione di ancoraggio dello spettro  $S a_g > 0.375g$ . Questa limitazione deriva dall'attuale carenza di studi sperimentali sul comportamento di strutture con armature di FRP soggette a sismi che possano indurre grandi spostamenti.

A questo riguardo, le possibili applicazioni delle strutture in calcestruzzo armato con armature non metalliche sono raggruppabili nelle tre seguenti categorie:

- a) Strutture per le quali il sisma provoca ridotte variazioni delle sollecitazioni rispetto a quelle valutate per le combinazioni non sismiche e strutture non appartenenti allo schema resistente alle azioni sismiche;
- b) Strutture che fanno parte dello schema resistente alle azioni sismiche, progettate come non dissipative (con fattore di comportamento  $1 \leq q \leq 1.5$ );
- c) Strutture che fanno parte dello schema resistente alle azioni sismiche, progettate in campo dissipativo, con regole ispirate ai concetti di duttilità. In questo caso è necessario progettare strutture con armatura ibrida, cioè utilizzare entrambi i tipi di armatura, metallica e non metallica.

Queste categorie che, come detto, possono riguardare l'intera struttura o singoli elementi strutturali, vengono descritte nel dettaglio nelle sezioni successive, unitamente ai criteri di calcolo delle azioni, delle sollecitazioni e delle verifiche, nonché a specifiche prescrizioni da seguire nei vari casi.

### 8.2 STRUTTURE PER LE QUALI IL SISMA PROVOCA RIDOTTE VARIAZIONI DELLE SOLLECITAZIONI RISPETTO A QUELLE VALUTATE PER LE COMBINAZIONI NON SISMICHE

(1) Questa categoria di strutture è utilizzabile in zone a sismicità da molto bassa a media, per le quali allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV) il valore dell'accelerazione di ancoraggio dello spettro  $S a_g < 0.375g$ . Ricadono in questa categoria:

- a) le strutture per le quali l'azione sismica produce incrementi di sollecitazione ridotti o nulli rispetto alle combinazioni non sismiche;

b) gli elementi strutturali che non partecipano alla struttura resistente per le azioni orizzontali.

Per rientrare in questa categoria, deve essere verificato che, per l'intera struttura o per singoli elementi strutturali, le verifiche agli SLU (combinazioni non sismiche) risultino più severe di quelle agli SLV (combinazioni sismiche), anche in ragione dei maggiori fattori parziali relativi alle azioni che si applicano nel primo caso.

Esempi di queste strutture sono le seguenti:

- strutture di copertura in appoggio sulle strutture portanti verticali, quali ad esempio elementi prefabbricati di copertura;
- solette da ponte;
- pavimentazioni ed elementi secondari quali cordoli, tubazioni.

(2) La non rilevanza delle azioni sismiche nella specifica applicazione deve essere valutata o con considerazioni generali, o con valutazioni semplificate del comportamento dell'elemento di interesse nell'ambito della struttura, oppure con una valutazione più accurata del comportamento d'insieme e quindi delle azioni che agiscono sull'elemento di interesse. Una valutazione di tipo semplificato, a favore di sicurezza, dell'azione sismica può essere condotta con riferimento allo spettro elastico ( $q=1$ ) e, per quanto riguarda il periodo di vibrazione, con riferimento al plateau dello spettro di risposta oppure, nel caso di strutture a terra, con riferimento all'accelerazione di ancoraggio dello spettro.

Per queste strutture, le verifiche possono essere condotte con riferimento ai criteri di calcolo descritti al Capitolo 6, senza ulteriori prescrizioni.

(3) Nel caso in cui la struttura principale sia progettata per le azioni sismiche con armature metalliche, gli elementi strutturali realizzati con barre di FRP, che non fanno parte dello schema resistente alle azioni orizzontali, devono essere in grado di assorbire le deformazioni imposte dalla struttura principale.

### 8.3 STRUTTURE PROGETTATE COME NON DISSIPATIVE

(1) Questa categoria di strutture è utilizzabile in zone a sismicità molto bassa o bassa, per le quali allo SLV il valore dell'accelerazione di ancoraggio dello spettro  $S a_g < 0.225g$ .

(2) Ricadono in questa categoria le strutture o gli elementi strutturali per i quali, nel calcolo di domanda e capacità, tutte le membrature e i collegamenti rimangono in campo elastico o sostanzialmente elastico. Il fattore di comportamento può essere scelto nell'intervallo  $1 \leq q \leq 1.5$ , adottando valori maggiori di 1 nel caso in cui si possa assumere che una deviazione dal comportamento perfettamente elastico dei materiali (ad esempio del calcestruzzo in compressione o in trazione per effetto della fessurazione) comporti una certa dissipazione di tipo isteretico nel legame forza – deformazione. Nel caso dei ponti, una progettazione con criteri non dissipativi richiede di utilizzare  $q=1$ .

Esempi di queste strutture sono le seguenti:

- strutture che si intende mantenere in campo sostanzialmente elastico anche durante il sisma, al fine di non avere danneggiamento, ad esempio:
  - alcune tipologie di pile da ponte;
  - strutture con comportamento rocking;
  - elementi prefabbricati di tamponamento;
- strutture nelle quali siano installati sistemi supplementari di dissipazione o di isolamento;
- strutture di fondazione superficiali e profonde (vedi anche par. 8.5);
- strutture di protezione delle coste, muri di sostegno.

(3) Di particolare rilevanza, nell'elenco sopra riportato, è quello delle strutture progettate per rimanere in campo elastico anche durante il sisma. Questa scelta progettuale è infatti raccomandabile quando i danni conseguenti alle deformazioni residue che si possono verificare nelle strutture a valle di un sisma possono provocare danni economici rilevanti fino, in alcuni casi, alla necessità di demolizione e ricostruzione delle opere.

In questo caso, i criteri di progettazione sono ispirati a quelli delle strutture in calcestruzzo armato tradizionali non dissipative e, in generale, non sono richiesti dettagli aggiuntivi rispetto a quelli delle strutture non progettate per azioni sismiche. Per i nodi va verificato vi sia un ancoraggio adeguato delle barre all'interno del nodo.

In particolare, le azioni sismiche vanno calcolate con riferimento allo spettro di progetto ridotto del fattore di comportamento  $q$  (se la valutazione di  $q$  eseguita come descritto al punto (2) fornisce un valore maggiore di 1).

Nel caso di tipologie strutturali particolarmente vulnerabili all'azione sismica, tra cui ricadono quelle di seguito elencate:

- **costruzioni in calcestruzzo:** strutture deformabili torsionalmente, strutture a pendolo inverso e strutture a pendolo inverso intelaiate monopiano (queste ultime se irregolari in altezza);
- **costruzioni con struttura prefabbricata:** strutture monolitiche a cella e strutture con pilastri incastrati e orizzontamenti incernierati (queste ultime se irregolari in altezza).

è opportuno assumere un valore di  $q$  pari a 1

Nelle verifiche degli elementi strutturali, il momento resistente di progetto è calcolato con riferimento al comportamento sostanzialmente elastico delle sezioni (si veda il Capitolo 6 relativo alle verifiche agli Stati Limite Ultimi - SLU).

#### 8.4 STRUTTURE PROGETTATE IN CAMPO DISSIPATIVO

(1) Questa categoria di strutture è utilizzabile in zone a media e bassa sismicità per le quali allo SLV il valore dell'accelerazione di ancoraggio dello spettro  $S_{ag} < 0.375g$ .

(2) Ricadono in questa categoria le strutture per le quali, nel calcolo dell'azione sismica e nelle verifiche degli elementi strutturali, si fa riferimento ad un comportamento non lineare e dissipativo delle strutture.

(3) Una progettazione in campo dissipativo è raccomandata per strutture a telaio di edifici o per ponti in zone a media sismicità, a meno che non siano installati sistemi supplementari di riduzione dell'azione sismica, come ad esempio sistemi di isolamento sismico alla base. Nel caso di ponti progettati con comportamento strutturale dissipativo, la struttura del ponte deve essere concepita e dimensionata in modo tale che, sotto l'azione sismica relativa allo SLV, essa dia luogo alla formazione di un meccanismo dissipativo stabile nel quale la dissipazione sia limitata alle pile.

(4) Il soddisfacimento delle regole di progettazione in campo dissipativo richiede, almeno per le porzioni di struttura oggetto di potenziale formazione di cerniere plastiche, l'utilizzo di armature metalliche.

(5) Nella progettazione delle strutture in campo dissipativo, devono essere soddisfatte le regole di progettazione in classe di duttilità CD "A" o CD "B" previste dalle norme vigenti per le strutture in calcestruzzo armato ordinario con barre metalliche, sia in termini di dettagli costruttivi che di verifiche, incluse le verifiche di duttilità allo Stato Limite di Collasso (SLC) delle sezioni in termini di curvatura. Il fattore di comportamento  $q$  deve essere calcolato secondo le norme vigenti con riferimento alla Classe di duttilità prescelta (CD "A" o CD "B").

(6) Tra le regole di progettazione in classe di duttilità CD "A" o CD "B" (a seconda della classe prescelta), le più rilevanti sono i criteri di gerarchia delle resistenze. Per una corretta applicazione

dei criteri di gerarchia delle resistenze, ed in particolare della maggiore resistenza dei pilastri rispetto alle travi, si deve tenere in conto, nella valutazione del momento resistente delle travi, dell'eventuale presenza di barre di FRP che può aumentare il momento resistente delle travi stesse se le barre sono ancorate nei nodi. Di fatto i fattori di sovrarresistenza da adottare nella progettazione devono essere valutati in relazione all'effettiva armatura di FRP presente e non possono essere utilizzati quelli delle sezioni in c.a.

(7) Le strategie di progettazione di una struttura a comportamento dissipativo con armature ibride possono essere diverse. Comune denominatore è quello di porre le armature metalliche più interne e quindi protette nei riguardi degli agenti aggressivi, e quelle di FRP più esterne. Ad esempio:

a) Approccio n. 1

- Le armature longitudinali sono (più interne) in acciaio e (più esterne) di FRP;
- Le armature trasversali sono costituite da:
  - o (più interne) Staffe metalliche nelle zone critiche a confinare, assieme alle armature longitudinali metalliche, il calcestruzzo;
  - o (più esterne) Staffe di FRP a costituire, unitamente alle barre longitudinali di FRP, la gabbia di armature lungo l'intero elemento non strutturale, cui è demandata la resistenza a taglio.

b) Approccio n. 2:

- Le armature longitudinali sono in acciaio e di FRP, dove:
  - o le armature metalliche, disposte principalmente nelle zone critiche, consentono di soddisfare tutti i criteri previsti dalle attuali norme di progettazione in classe di duttilità CD "A" o CD "B";
  - o le armature di FRP integrano le armature metalliche per le sollecitazioni di tipo statico (verifiche SLU) e dove le sollecitazioni sismiche sono ridotte. In questi tratti il momento ultimo deve essere calcolato con riferimento al comportamento sostanzialmente elastico;
- Le armature trasversali sono costituite da:
  - o Staffe metalliche nelle zone critiche a confinare il calcestruzzo;
  - o Staffe di FRP a costituire, unitamente alle barre longitudinali di FRP, la gabbia di armature più esterna lungo l'intero elemento non strutturale. Ad esse è demandata la resistenza a taglio.

(8) Qualora si adotti un approccio differente rispetto a quelli descritti al punto (6), e in particolare si faccia uso di staffe di GFRP nelle zone critiche, è indispensabile garantire che queste rimangano in campo elastico. Inoltre, deve essere assicurata l'equivalenza della rigidezza assiale (EA) delle barre di GFRP con quella che si otterrebbe utilizzando staffe in acciaio, al fine di garantire un confinamento adeguato del calcestruzzo, considerando che il modulo elastico del GFRP è inferiore a quello dell'acciaio.

## 8.5 STRUTTURE DI FONDAZIONE

(1) Per le strutture in calcestruzzo armato con barre metalliche, le Norme vigenti prescrivono che le strutture di fondazione e i relativi elementi strutturali siano progettati sulla base della domanda ad essi trasmessa dalla struttura sovrastante attribuendo loro un comportamento strutturale non dissipativo, indipendentemente dal comportamento attribuito alla struttura su di essi gravante. Per questo motivo, le fondazioni possono essere progettate e realizzate con barre di FRP, con evidenti benefici per quanto riguarda la durabilità della struttura.

(2) Le azioni trasmesse alle fondazioni derivano dall'analisi del comportamento dell'intera opera, in genere condotta esaminando la sola struttura in elevazione. Le azioni agenti sulle fondazioni, trasmesse dagli elementi soprastanti, sono calcolabili utilizzando uno dei seguenti approcci:

- Eseguendo l'analisi strutturale ipotizzando comportamento strutturale non dissipativo;
- Dalla capacità di resistenza a flessione degli elementi, congiuntamente al taglio determinato da considerazioni di equilibrio;
- Dalle azioni trasferite dagli elementi soprastanti nell'ipotesi di comportamento strutturale dissipativo, amplificata di un coefficiente pari a 1.30 in CD "A" e 1.10 in CD "B".

(3) Nel caso di utilizzo di armature di FRP in fondazione, non potendo contare su una loro riserva di duttilità, sono raccomandati i primi due approcci, che assicurano che le sollecitazioni trasmesse non siano superiori a quelle calcolate. Ne consegue che il dimensionamento delle opere di fondazione in termini di resistenza va sempre fatto sulla base del momento sostanzialmente elastico già citato in precedenza.

(4) In caso di fondazioni su pali, per la progettazione in zona sismica, è sconsigliato l'utilizzo di armature di FRP per i pali, stante la mancanza di duttilità delle barre di FRP e l'impossibilità di verificare l'eventuale insorgenza di danneggiamenti a valle di un evento sismico.

## **9 PRESCRIZIONI RELATIVE ALL'ESECUZIONE**

### **9.1 SPEDIZIONE MATERIALE IN CANTIERE**

(1) Ogni barra deve essere chiaramente identificata con le seguenti informazioni: numero di lotto, nome del Fabbricante e del prodotto commerciale certificato, diametro nominale della barra secondo Tabella 3-2 e classe secondo Tabella 3-3.

(2) Qualora il Fabbricante non possa stampigliare le informazioni suddette sulle barre, è indispensabile che le barre spedite in un'unica soluzione abbiano almeno un cartellino per ogni fascio di barre trasportate che riporti le informazioni sopra richieste. Tale cartellino deve essere presente per ogni fascio di barre e per ogni tipologia di barra.

(3) Nel caso di fornitura di barre piegate, oltre alle informazioni suddette, va riportato anche il raggio di curvatura minimo certificato dal Fabbricante.

### **9.2 STOCCAGGIO IN CANTIERE**

(1) Le barre di FRP devono essere conservate con attenzione per evitare danni superficiali che potrebbero comprometterne durabilità, capacità portante e aderenza al calcestruzzo.

(2) Sebbene le barre di FRP siano resistenti alla corrosione, possono degradarsi se esposte ai raggi UV per lunghi periodi o sottoposte a temperature elevate, pertanto è consigliabile stoccare le barre possibilmente collocate su pallet per evitare un contatto diretto con il terreno, specialmente nel caso di stoccaggio per lunghi periodi. Nel caso di stoccaggio all'esterno, salvo diversamente indicato dal Fabbricante, devono essere protette dai raggi UV mediante protezione opaca e da agenti contaminanti chimici. Nel caso di barre ad aderenza migliorata mediante sabbatura esterna, si deve evitare il contatto diretto con acqua corrente che possa dilavare la quarzatura, salvo diversamente indicato dal Fabbricante.

(3) Il Fabbricante deve chiaramente indicare tempi e modalità di stoccaggio delle barre. Queste indicazioni devono essere seguite rigorosamente in cantiere.

### **9.3 MANIPOLAZIONE IN CANTIERE**

(1) Le barre di FRP devono essere manipolate con cautela per evitare danni superficiali, come incisioni profonde, che potrebbero compromettere la resistenza e la durabilità del materiale.

(2) Salvo diversamente indicato dal Fabbricante, gli operatori devono indossare guanti di sicurezza per prevenire schegge, tagli o irritazioni della pelle causate dalle fibre contenute nelle barre.

(3) Il taglio delle barre deve essere eseguito mediante flessibili con dischi diamantati ad alta velocità o seghe a lama fine, evitando assolutamente l'uso di cesoie che potrebbero causare crepe nella resina o danni alle fibre.

(4) Le operazioni di sollevamento devono utilizzare punti di supporto multipli per distribuire uniformemente il carico ed evitare sollecitazioni localizzate. Questo aspetto risulta ancora più critico nel sollevamento di gabbie, a seguito della minore resistenza al taglio delle armature di FRP.

(5) Qualora il materiale venga fornito in bobine, è necessario prestare particolare attenzione durante l'apertura per evitare danneggiamenti o seri infortuni agli operatori incaricati.

## 9.4 POSA IN OPERA

- (1) La posa in opera delle barre di FRP deve essere eseguita seguendo scrupolosamente le indicazioni della Direzione Lavori ed eventuali suggerimenti dei produttori.
- (2) Qualsiasi barra che presenti una superficie esterna danneggiata o comunque alterata durante il trasporto o le movimentazioni in cantiere deve essere scartata e/o opportunamente verificata previo confronto anche con il Fabbrikante e la Direzione Lavori. Le istruzioni riguardanti il posizionamento e le tolleranze devono essere definite prima dell'installazione e approvate dal tecnico responsabile.
- (3) Le barre di FRP non possono essere piegate in cantiere; eventuali piegature o ganci devono essere realizzati dal Fabbrikante durante il processo di fabbricazione. In cantiere non può essere accettata una barra piegata avente un raggio di curvatura della piegatura,  $r_t$ , inferiore a quello certificato dal Fabbrikante in fase di qualificazione.
- (4) Durante il getto del calcestruzzo, è essenziale che le barre siano adeguatamente fissate con legature per evitare spostamenti o galleggiamenti. Le legature possono essere realizzate esattamente come per le barre di acciaio, ma possono essere altresì adottati materiali non corrosivi, come fascette in plastica o nylon, specialmente nel caso di barre in carbonio, per evitare fenomeni di corrosione galvanica. Esclusivamente nel caso di opere con barre in fibra di carbonio, è necessario evitare il contatto diretto fra barre in acciaio e barre in carbonio FRP. Per le barre di FRP con fibre di vetro, invece, non risultano alcune controindicazioni al contatto diretto con barre di acciaio.
- (5) Durante le operazioni di vibrazione del calcestruzzo, è necessario prestare attenzione a non danneggiare le armature.
- (6) Queste indicazioni, in linea con le normative internazionali, garantiscono l'integrità strutturale e la durabilità delle barre di FRP utilizzate nelle costruzioni in calcestruzzo.

## 10 ALTRE APPLICAZIONI

### 10.1 PREMESSA

Le barre di FRP possono essere utilizzate in molte applicazioni oltre che per la realizzazione di nuove opere di calcestruzzo armato. Sebbene le presenti Istruzioni riportino criteri di progetto per tale tipologia di costruzioni, è utile citare alcuni degli ulteriori possibili ambiti di utilizzo delle barre di FRP, sia per la realizzazione di altre tipologie strutturali che per il rinforzo di strutture esistenti.

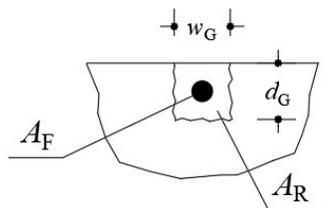
### 10.2 BARRE DI FRP COME SISTEMI DI RINFORZO PER STRUTTURE ESISTENTI

#### 10.2.1 Rinforzo esterno con tecnica NSM

(1) Le barre di FRP possono essere utilizzate come rinforzo esterno di strutture esistenti in c.a. e muratura inserendole in appositi intagli superficiali (tecnica NSM, Near Surface Mounted) riempiti di resina o di malta ad alta resistenza (Figura 10-1a-b). Queste applicazioni sono ormai diffuse e promettenti (De Lorenzis e Teng, 2007; Bilotta et al., 2016; Dias et al., 2018; Ferretti et al., 2024), stanti le elevate prestazioni delle barre di FRP in termini di durabilità e il ridotto peso, che ne facilita la movimentazione e la messa in opera.

(2) L'utilizzo di barre di FRP secondo la tecnica NSM può rappresentare una soluzione di rinforzo molto conveniente per le infrastrutture viarie in calcestruzzo armato e precompresso grazie alla loro leggerezza, resistenza e durabilità (Figura 10-1c). Il loro impiego consente di incrementare la capacità portante degli elementi strutturali senza aumentarne significativamente il peso, risultando una soluzione particolarmente vantaggiosa per ponti, viadotti e gallerie. Inoltre, la resistenza alla corrosione delle barre di FRP le rende adatte a interventi in ambienti aggressivi, dove le armature in acciaio tradizionali sono soggette a degrado, e, quindi, nel caso specifico delle infrastrutture ne migliora la durabilità, riducendo i costi di manutenzione e prolungando la vita utile delle opere.

(3) Specifiche indicazioni progettuali per il calcolo dell'incremento di capacità resistente degli elementi rinforzati con barre di FRP applicate secondo la tecnica NSM sono riportate nelle Istruzioni CNR DT200/R2-2025.



(a)



(b)



(c)

Figura 10-1 Applicazione di barre di FRP con la tecnica NSM: a) posizionamento della barra nella scanalatura; b) rinforzo di una soletta in c.a. all'intradosso (*fib* bulletin 90, 2019); c) rinforzo di infrastrutture viaria all'estradosso (per gentile concessione di Sireg Geotech).

### 10.2.2 Ristilatura armata di giunti di malta

(1) Le barre di FRP possono essere utilizzate negli interventi di ristilatura armata profonda di giunti di malta ammalorati in elementi di muratura (*'repointing'*, Figura 10-2). L'intervento determina incrementi di resistenza e di rigidezza dell'elemento murario in funzione dello spessore della muratura e della profondità della ristilatura ed, in misura maggiore, se l'intervento è realizzato su entrambi i lati del paramento murario. Il collegamento delle barre inserite nei giunti di malta con ulteriori elementi resistenti a trazione utilizzati come connettori trasversali dei paramenti murari permette di realizzare un sistema di armature continuo nelle tre direzioni e può migliorare ulteriormente l'efficacia dell'intervento.

(2) La valutazione dell'incremento di capacità resistente degli elementi murari in cui sia stata realizzata una ristilatura armata con barre di FRP dei giunti di malta può essere eseguita sulla base delle indicazioni riportate nelle Istruzioni CNR DT200/R2-2025 per la tecnica NSM, adottando come proprietà meccaniche del supporto quelle della malta utilizzata per la ristilatura dei giunti.



Figura 10-2 Applicazione di barre di FRP come armatura per la ristilatura dei giunti in paramenti murari ([www.mapei.it](http://www.mapei.it)).

### 10.2.3 Miglioramento della connessione tra elementi di muratura

(1) Le barre di FRP possono essere utilizzate come sistema di connessione tra elementi murari in corrispondenza di spigoli o intersezioni tra pareti ortogonali inserendole in apposite perforazioni riempite di malta (iniezioni armate, Figura 10-3a), al fine di limitare la vulnerabilità di tali elementi a meccanismi di ribaltamento fuori piano.

L'incremento di capacità dell'elemento murario in presenza di connessioni realizzate con barre di FRP, espressa in termini di accelerazione di innesco del meccanismo di ribaltamento, può essere stimato mediante l'analisi dei cinematismi di corpo rigido secondo le procedure riportate nella Normativa vigente (Figura 10-3b) tenendo conto del contributo stabilizzante delle barre di FRP (Maione et al., 2023). Il massimo contributo esplicabile da una data barra di FRP, in accoppiamento ad una specifica malta di iniezione, deve essere stimato mediante prove sperimentali di estrazione dal substrato murario oggetto dell'intervento o tramite indicazioni di letteratura di comprovata validità (Ceroni e Di Ludovico, 2020) e assumendo come limite superiore la tensione di rottura per trazione della barra allo SLU data dalla (4.2).

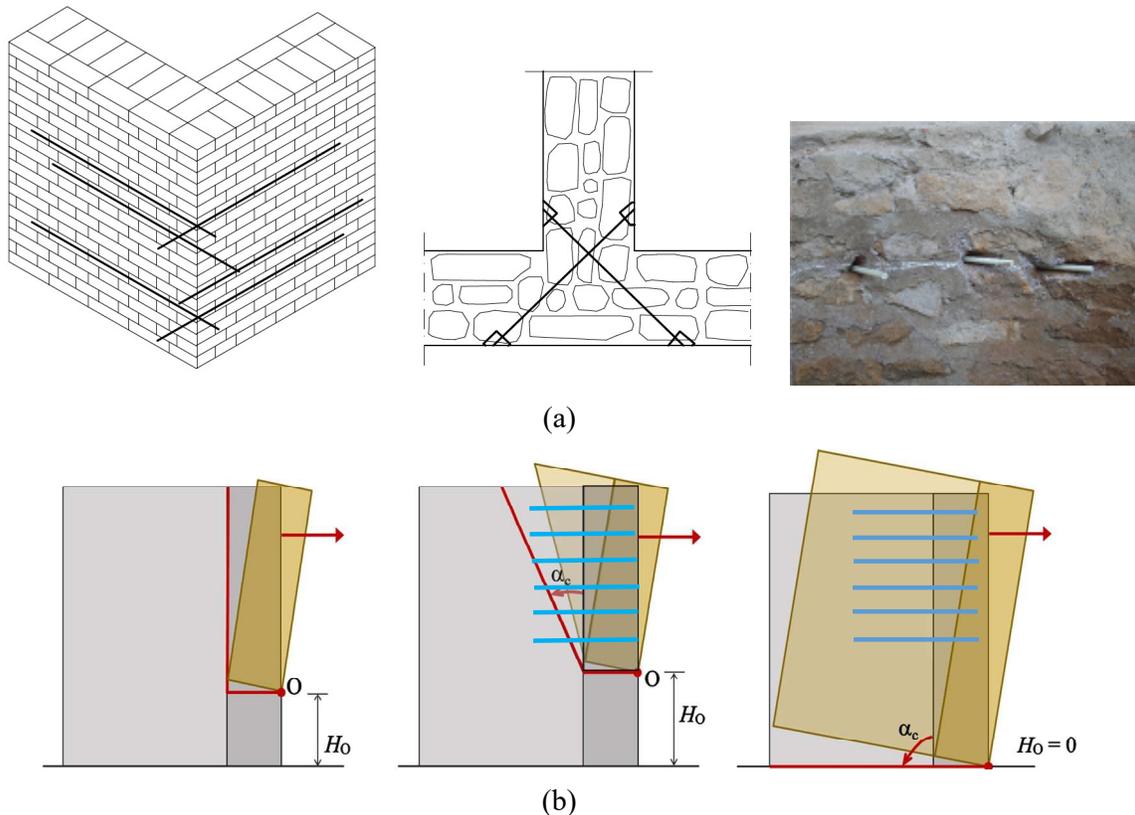


Figura 10-3 a) Utilizzo di barre di FRP per iniezioni armate in elementi murari; b) effetto di cucitura delle barre di FRP sulla forma e le dimensioni del macro-blocco coinvolto nel cinematismo fuori piano individuato dall'altezza  $H_0$  della cerniera e dall'angolo di inclinazione della lesione  $\alpha_c$  (Maione et al., 2023).

(2) Le barre di FRP a sezione circolare o rettangolare possono essere utilizzate come tiranti (catene) con funzione di connessione tra pareti per edifici esistenti in muratura al fine di migliorare il comportamento scatolare dell'intera struttura (Figura 10-4a). Il dimensionamento delle barre può essere svolto con gli stessi criteri utilizzati per tiranti in acciaio, tenendo conto che la massima tensione di lavoro delle barre di FRP allo SLU di rottura per trazione è data dalla (4.2).

Particolare attenzione deve essere posta al sistema di ancoraggio della barra di FRP per garantire un'adeguata azione di contrasto rispetto a spostamenti fuori piano delle pareti collegate (catena passiva) o il livello assegnato di pretensione in caso di applicazione di una tensione di trazione alla barra di FRP (catena attiva). Il sistema di ancoraggio delle barre di FRP (si veda un esempio in Figura 10-4b per barre di GFRP a sezione rettangolare) deve essere, infatti, opportunamente progettato e dimensionato in maniera tale da evitare sia una eccessiva concentrazione di tensioni nella muratura,

sia il danneggiamento delle barre di FRP nella zona di ancoraggio, tenendo conto del fatto che le proprietà meccaniche in direzione trasversale all'asse delle fibre sono molto inferiori a quelle nella direzione delle fibre stesse.

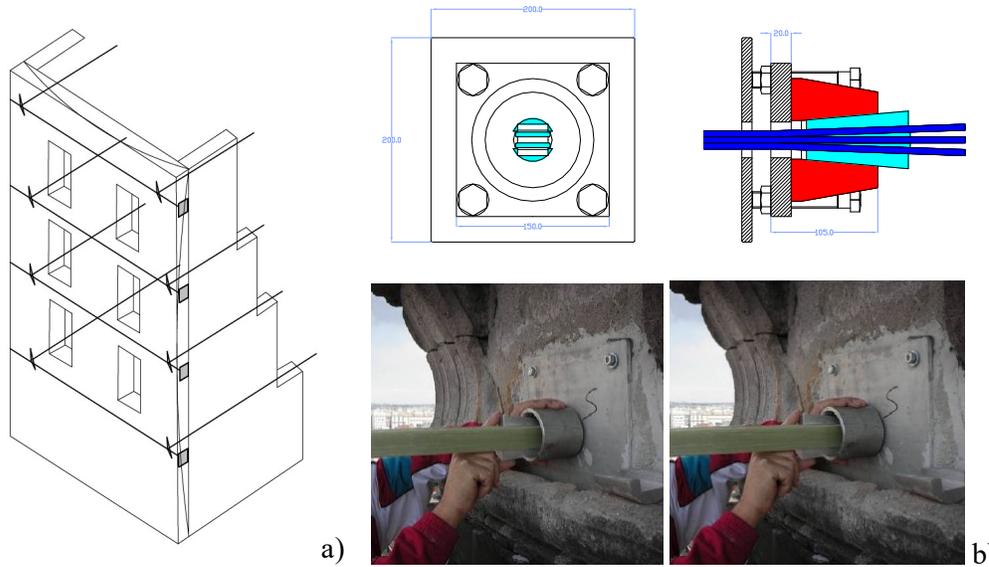


Figura 10-4 a) Applicazione di barre di FRP come tiranti in edifici in muratura, b) esempio di sistema di ancoraggio di estremità per barre di GFRP a sezione rettangolare (Ceroni e Prota, 2009).

### Bibliografia essenziale

1. Ceroni F., Prota A. (2009) *Case study: Seismic upgrade of a masonry bell tower by GFRP ties*, ASCE Journal of Composite for Construction, 13 (3): 188-197.
2. Ceroni F., Di Ludovico M. (2020) *Traditional and innovative systems for injected anchors in masonry elements: experimental behaviour and theoretical formulations*, Construction and Building Materials, 254, art. no. 119178.
3. De Lorenzis, L., and Teng, J. G. (2007) *Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for structural strengthening.* Compos., Part B, 38, 119–143.
4. Dias S. J. E., Barros J. A. O., Janwaen W. (2018) *Behavior of RC beams flexurally strengthened with NSM CFRP laminates*, Composite Structures, 201, 363-376.
5. Bilotta, A., Ceroni, F., Barros, J., Costa, I., Palmieri, A., Szabo, Z., Nigro, E., Matthys, S., Balazs, G., Pecce, M., (2016) *Bond of NSM FRP strengthened concrete: Round Robin Test initiative*, ASCE Journal of Composites for Construction, 20 (1), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000579](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000579).
6. Istruzioni CNR DT200/R2-2025, Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati - Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, Italia.
7. Ferretti F., Tilocca A.R., Incerti A., Barattucci S., Savoia M. (2024) *Use of CFRP rebars as retrofitting system for masonry panels*. American Concrete Institute, ACI Special Publication, SP-360:413-422, 16<sup>th</sup> Int. Symposium on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS 2024, 23-24 March 2024, New Orleans, Louisiana, USA.
8. *fib* bulletin 90, Externally applied FRP reinforcement for concrete structures, Technical Report, Task Group 5.1, the International Federation for Structural Concrete, ISBN: 978-2-88394-132-8.
9. Maione A., Casapulla C., Di Ludovico M., Prota A., Ceroni F. (2023). *Limit analysis and design-oriented approach for Out-of-plane loaded masonry walls strengthened by grouted anchors*, Engineering Structures, Vol. 285, 15 June 2023, 115991, doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115991.

### 10.3 APPLICAZIONI DI BARRE DI FRP PER IL CONTENIMENTO DEI TERRENI

(1) Le barre di FRP possono essere utilizzate come tiranti post-tensionati per il mantenimento dei fronti di scavo durante le operazioni di scavo o per la stabilizzazione definitiva di pendii instabili o scarpate artificiali come cavi post-tesi per paratie in c.a. (10-5a) o direttamente inseriti in fori realizzati in precedenza nel terreno e poi cementati (*soil nails*, Figura 10-5b). Le barre di FRP sono particolarmente indicate per questo tipo di interventi in quanto non sono soggette a corrosione e possono essere utilizzate anche in terreni contenenti sostanze aggressive dal punto di vista chimico. Il dimensionamento delle barre di FRP per tali applicazioni può essere svolto utilizzando le stesse procedure adottate per tiranti in acciaio, tenendo conto che la massima tensione di lavoro delle barre di FRP allo SLU di rottura per trazione è data dalla (4.2).

(2) Le barre di FRP sono spesso utilizzate anche per la stabilizzazione provvisoria dei fronti di scavo di gallerie scavate con tecniche tradizionali. Questa tecnica di stabilizzazione del fronte di scavo richiede necessariamente barre che possano essere facilmente tagliate, in quanto queste devono essere poi fresate insieme con il terreno man mano che si avvanza con il fronte.

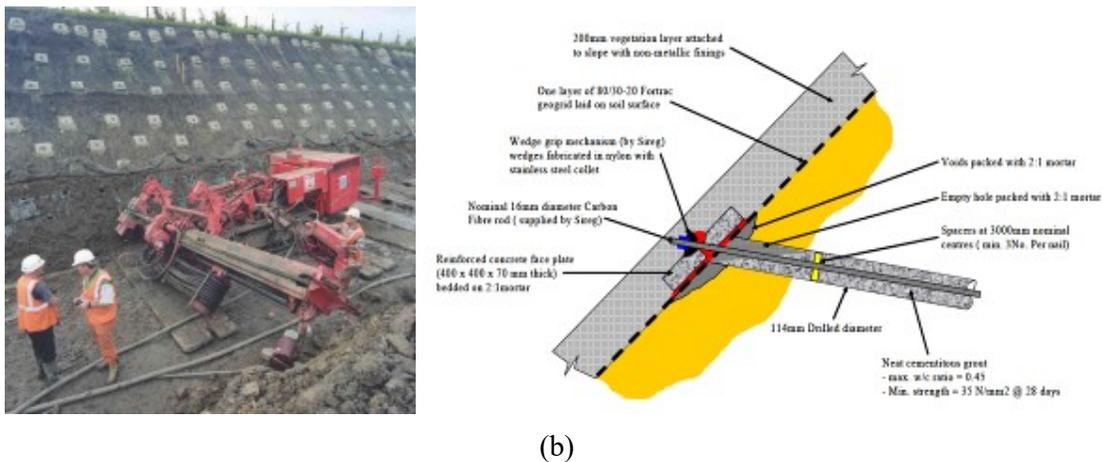


Figura 10-5. a) Applicazione di barre di FRP come tiranti post-tensionati (per gentile concessione di ATP); b) Applicazione di barre di FRP come 'soil nails' (per gentile concessione di Sireg Geotech).

(2) Le barre FRP possono trovare utile applicazione come armatura di rinforzo in palificate in calcestruzzo per realizzare barriere protettive da inondazioni in prossimità delle coste (dighe marine o *sea-walls*, Figura 10-6, Steputat et al., 2022). La resistenza alla corrosione delle barre di FRP permette di aumentare la vita utile delle strutture realizzate in prossimità delle coste con una significativa riduzione dei costi di manutenzione e riparazione rispetto all'utilizzo delle barre in acciaio, a fronte anche delle modeste caratteristiche della sollecitazione agenti su tali palificate.

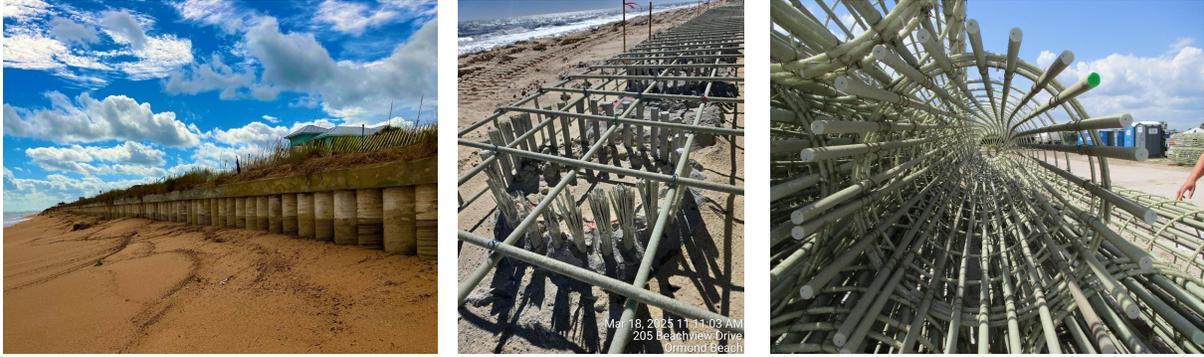


Figura 10-6. Esempi di applicazione di barre di FRP come armatura di *sea-walls*.

### **Bibliografia essenziale**

1. C. C. Steputat, J. O'Connor, M. Arrants, J. Beech, A. Nanni (2022). GFRP-RC Seawalls as a means of coastal fortification and extended service life, *Concrete International*, Novembre 2022, pp. 36-42.

#### 10.4 APPLICAZIONI DI BARRE DI FRP PER STRUTTURE TEMPORANEE

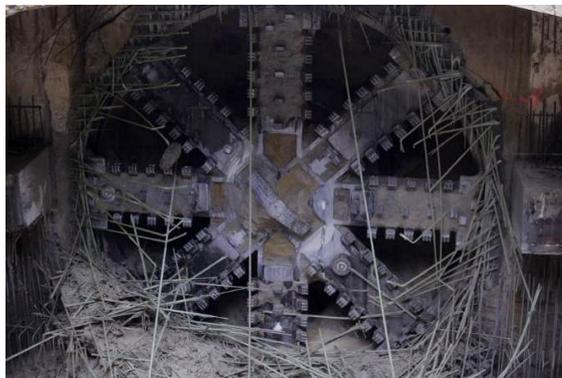
Le barre FRP possono essere utilizzate come ‘*soft-eyes*’ (Mohameda et al., 2020) per la realizzazione di scavi sotterranei (per esempio in scavi metropolitani). La ridotta resistenza a taglio delle barre di FRP, in particolare di quelle in fibra di vetro, le rendono, infatti, particolarmente idonee per il rinforzo temporaneo dei diaframmi temporanei realizzati per la costruzione di gallerie e che devono essere parzialmente distrutti da una fresa meccanica a piena sezione (Tunnel Boring Machine, TBM). Il ‘*soft-eye*’ è una gabbia di rinforzo che utilizza barre e staffe di GFRP (Figura 10-7a), che possono essere facilmente tagliate dalla TBM (Figura 10-7b). La leggerezza delle barre di FRP favorisce anche le operazioni di trasporto ed assemblaggio in sito della gabbia di armatura. Tale tecnica permette di ridurre notevolmente i tempi di costruzione dei diaframmi.



(a)



(b)



(c)

Figura 10-7. Esempi di applicazione di barre di FRP per la realizzazione di diaframmi temporanei per scavo di tunnel (*soft-eyes*): (a) *fib* bulletin 40, (b) metropolitana di Roma (per gentile concessione di ATP); (c) <https://www.dextragroup.com/ground-engineering/tunneling/astec-soft-eyes/>

#### Bibliografia essenziale

1. H. M. Mohameda, A. H. Alia, A. Hadhooda, S. Mousab, W. Abdelazima, B. Benmokrane (2020). Testing, design, and field implementation of GFRP RC *soft-eyes* for tunnel construction, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 106, 103626.
2. *fib* bulletin 40, (2007) FRP reinforcement in RC structures, Technical report, ISBN 978-2-88394-080-2.

## 10.5 BARRE DI FRP COME ARMATURA IN ELEMENTI NON STRUTTURALI

(1) Le barre di FRP possono essere utilizzate come armatura, anche in forma di reti, per la realizzazione di elementi di calcestruzzo non strutturali, quali ad esempio solette di pavimentazione o elementi prefabbricati non portanti (Roghani et al., 2022). Il vantaggio dell'utilizzo di barre di FRP è evidente soprattutto in caso di applicazioni in ambienti aggressivi in cui le barre di acciaio sono soggette a problemi di corrosione (in prossimità di aree marine, ad esempio). La presenza delle barre di FRP in tali elementi è finalizzata a controllare i fenomeni fessurativi legati alle variazioni di temperatura ed al ritiro. A tal fine si ritengono valide le indicazioni fornite per armature metalliche (minimo passo tra le barre in funzione dello spessore della soletta e del diametro, copriferro minimo), ma studi sperimentali più approfonditi possono consentire di ridurre, ad esempio, i copriferri, quando indicati per proteggere le armature dall'ambiente esterno.

(2) Le barre di FRP trovano impiego anche come armature in rampe in calcestruzzo per l'alaggio di barche (Figura 10-8), in quanto non soggette alla corrosione causata dai cloruri e altri elementi aggressivi ed in grado, pertanto, di evitare o comunque limitare il degrado dovuto all'ambiente marino.



Figura 10-8. Applicazione di barre di FRP come armatura in rampe di alaggio di barche (per gentile concessione di Sireg Geotech).

### Bibliografia essenziale

1. H. Roghani, F. De Caso, A. Nanni (2022). Constructability of Slabs-On-Ground with FRP meshes as secondary reinforcement, 15<sup>th</sup> Int. Conference on Fibre-Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-15), & The 8th Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS-2022), 10-14 December 2022, Shenzhen, China.

## 10.6 APPLICAZIONI DI BARRE DI FRP COME ARMATURA DI ELEMENTI ESPOSTI AD INTERFERENZE ELETTROMAGNETICHE

Nelle infrastrutture viarie sono presenti impianti che possono essere sensibili alle interferenze elettromagnetiche, quali impianti di rilevamento passaggio treni, impianti di scambio per ferrovie/tramvie, impianti per il funzionamento delle metropolitane automatiche, impianti rilevamento passaggio caselli autostradali, ecc. Le tradizionali armature in acciaio possono interferire con le onde elettromagnetiche di questi impianti e, quindi, comprometterne il corretto funzionamento. Le barre in GFRP consentono, invece, la realizzazione di gabbie di armatura in materiale non conduttivo (Figura 10-9) e, quindi, trasparente alle onde elettromagnetiche, evitando potenziali malfunzionamenti degli impianti e garantendo la sicurezza delle relative infrastrutture.



Figura 10-9. Esempio di applicazione di barre di FRP come armatura di elementi esposti ad interferenze elettromagnetiche (per gentile concessione di Sireg Geotech).

## 11 APPENDICE A: Qualificazione e accettazione in cantiere dei materiali e dei prodotti

### 11.1 QUALIFICAZIONE DELLE BARRE DI FRP

Secondo quanto previsto dalla Normativa vigente (D.M. 17.1.2018, nel seguito NTC 18), la qualificazione dei materiali e i prodotti da costruzione per uso strutturale è obbligatoria e disciplinata dal Capitolo 11, il quale prevede tre casi:

- A) Prodotti che rientrano nell'ambito di applicazione di una norma armonizzata (hEN): in questo caso è obbligatoria la marcatura CE del prodotto (secondo quanto previsto dal Regolamento UE 2024/3110, in vigore dal 7 gennaio 2025, che a breve sostituirà il Regolamento UE 305/2011), la quale rappresenta l'unica modalità di qualificazione consentita.
- B) Prodotti che non rientrano nell'ambito di applicazione di una hEN, ma la cui qualificazione è esplicitamente disciplinata nelle norme tecniche.
- C) Prodotti che non ricadono né nel caso A) né nel caso B). Per tali prodotti la qualificazione è prevista alternativamente mediante:
  - la marcatura CE sulla scorta di un'apposita Valutazione Tecnica Europea (ETA, *European Technical Assessment*), a sua volta redatta in base ad uno specifico Documento per la Valutazione Europea, EAD (*European Assessment Document*);
  - un Certificato di Valutazione Tecnica (CVT), rilasciato dal Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, previa istruttoria del Servizio Tecnico Centrale, eventualmente sulla base di un'apposita Linea guida di qualificazione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

La marcatura CE per i prodotti da costruzione, come anticipato al punto A, è disciplinata dal Regolamento UE 2024/3110 (CPR, *Construction Product Regulation*), il quale definisce procedure armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione sul mercato dell'Unione Europea (UE). La marcatura CE di un prodotto da costruzione attesta che le informazioni che accompagnano il prodotto stesso, riepilogate nella Dichiarazione di Prestazione e Conformità (DoPC, che a breve sostituirà la Dichiarazione di Prestazione, DoP), sono state ottenute in accordo con quanto previsto nel Regolamento UE 2024/3110, e pertanto devono essere considerate accurate ed affidabili. Il fabbricante redige la DoPC (attualmente DoP) all'atto dell'immissione del prodotto sul mercato assumendosi la responsabilità della conformità del prodotto a quanto dichiarato. Per ulteriori informazioni sul significato della marcatura CE e dei Certificati di Valutazione Tecnica (CVT), può essere un utile riferimento quanto riportato nel CNR-DT 200/R2/2025.

Allo stato attuale non esistono norme armonizzate (hEN) per le barre di FRP.

Ai fini della qualificazione delle barre di FRP, è disponibile un Documento per la valutazione europea, l'EAD 260023-00-0301 *Carbon, glass, basalt and aramid fibre reinforced polymer bars as reinforcement of structural elements* (pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea con Decisione (EU) 2024/1944 ed indicato nel presente documento per brevità come 'EAD-barre FRP'), sulla scorta del quale è possibile arrivare alla marcatura CE mediante la redazione di apposite Valutazioni Tecniche Europee (ETA, *European Technical Assessment*).

È altresì disponibile la *Linea guida per l'identificazione, la qualificazione e l'accettazione di barre e staffe in composito fibrorinforzato per uso strutturale*, emanata dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nel dicembre 2021 (indicata nel presente documento per brevità come 'LG-barre FRP'), utile per la redazione dei Certificati di Valutazione Tecnica.

Gli EAD sono disponibili alla pagina web [eota.eu/eads](http://eota.eu/eads) dell'EOTA. Quelli inerenti ai Documenti Tecnici emanati del CNR sono altresì reperibili alla pagina web del CNR <https://www.cnr.it/it/norme-tecniche-costruzioni>.

## 11.2 CARATTERISTICHE DELLE BARRE DI FRP

Questo paragrafo contiene disposizioni per le proprietà dei prodotti necessarie per progettare in conformità con questo documento. L'appartenenza alle classi riportate in Tabella 3-3 e la legittimazione all'impiego di un prodotto deve essere garantita dall'ottenimento, durante il processo di qualificazione, di caratteristiche meccaniche che abbiano valori maggiori o uguali a quelli riportati in Tabella 11-1 e valutate in accordo a EAD-barre FRP o LG-barre FRP.

**Tabella 11-1** – Caratteristiche obbligatorie delle barre di FRP e relativi limiti di accettabilità

Caratteristica obbligatoria	Simbolo e unità di misura	Riferimento normativo	Limite di accettabilità
Area effettiva	$A_{eff}$ [mm <sup>2</sup> ]	EAD-barre FRP §2.2.2 LG-barre FRP – Tab. 1	Tabella 3-2
Diametro effettivo (barre circolari)	$d_{eff}$ [mm]	EAD-barre FRP §2.2.2 LG-barre FRP – Tab. 1	Tabella 3-2
Frazione volumetrica delle fibre o Frazione in peso delle fibre	$V_{fib}$ [%] $P_{fib}$ [%]	LG-barre FRP – Tab. 1 (* )	$\geq 70\%$ $\geq 50\%$
Resistenza a trazione caratteristica	$f_{fiko}$ [MPa]	EAD-barre FRP §2.2.2 LG-barre FRP – Tab. 2	Classi secondo Tabella 3-3
Modulo elastico longitudinale medio	$E_f$ [GPa]	EAD-barre FRP §2.2.2 LG-barre FRP – Tab. 2	Classi secondo Tabella 3-3
Temperatura di transizione vetrosa	$T_g$ [°C]	EAD-barre FRP §2.2.11 LG-barre FRP – Tab. 1	$\geq 100^\circ$
Massima temperatura di esercizio	$T_{max}$ [°C]	EAD-barre FRP §2.2.13 LG-barre FRP – Tab. 1	(**)
Resistenza a taglio trasversale (valore caratteristico)	$\tau_s$ [MPa]	EAD-barre FRP §2.2.5 LG-barre FRP – Tab. 2	$\geq 130$
Resistenza a taglio interlaminare (valore medio)	$\tau_i$ [MPa]	EAD-barre FRP §2.2.5 LG-barre FRP – Tab. 2	$\geq 38$
Resistenza media all'estrazione ( <i>pull-out</i> ) da supporto in calcestruzzo (barra centrata, calcestruzzo C20/25)	$\tau_{bm}$ [MPa]	EAD-barre FRP §2.2.4 LG-barre FRP – Tab. 2	$\geq 7.0$
Percentuale residua di resistenza media a trazione in ambiente alcalino (3000 ore, a 60 °C)	$R_{et,t}^{3000}$ [%]	EAD-barre FRP §2.2.16 LG-barre FRP – Tab. 2	$\geq 60\%$ per barre GFRP $\geq 80\%$ per barre CFRP
Per barre piegate - Raggio di curvatura (***) - Resistenza caratteristica della parte dritta - Resistenza caratteristica della parte piegata (****)	$r_t$ [mm] $f_{fik,st}$ [MPa] $f_{ubk}$ [MPa]	LG-barre FRP – Tab. 1 EAD-barre FRP §2.2.15 LG-barre FRP – Tab. 2 EAD-barre FRP §2.2.15 LG-barre FRP – Tab. 2/All. 3	Classi secondo Tabella 3-3 $\geq 40\% f_{fik,st}$

\* Tale caratteristica non è dichiarata in DoPC, ma sarà cura del Fabbrikante riportarne il valore in una dichiarazione da lui sottoscritta.

\*\* La temperatura di esercizio dell'elemento posto in opera, stimata secondo la normativa vigente, deve essere compatibile con la temperatura di esercizio dichiarata dal Fabbrikante, in particolar modo per gli elementi esposti a variazioni termiche significative.

\*\*\* Il diametro minimo del mandrino per realizzare la piegatura ( $2 r_t$ ) deve essere almeno pari a 7 volte il diametro nominale della barra,  $d_b$ , per diametri maggiori di 16 mm, e pari almeno a 4 volte  $d_b$ , per diametri minori di 16 mm.

\*\*\*\* La modalità di crisi rilevata nella prova non deve essere per sfilamento, in quanto ciò evidenzerebbe che il raggio di curvatura  $r_t$  o la lunghezza di barra  $L_t$  al di là della sagomatura sono inadeguati. Nel caso di staffe, la lunghezza  $L_t$  deve essere non inferiore alla larghezza,  $B_s$ , della staffa stessa e i due tratti di lunghezza  $L_t$  oltre le sagomature saranno in semplice sovrapposizione. Nel caso di barre piegate con funzione di ancoraggio, la lunghezza  $L_t$  deve essere almeno pari a 12 volte il diametro nominale della barra,  $d_b$ .

Oltre alle caratteristiche riportate nella Tabella 11-1, possono essere qualificate altre caratteristiche fisiche e meccaniche delle barre di FRP e, in particolare, quelle descritte nella successiva Tabella 11-2. Per le modalità di determinazione di queste proprietà, si può fare riferimento all'EAD-barre FRP o alle LG-barre FRP.

### **Bibliografia essenziale**

1. EAD 2024, EAD 260023-00-0301, *Carbon, glass, basalt and aramid fibre reinforced polymer bars as reinforcement of structural elements*. 2019, EOTA, OJ Publication: Decision (EU) 2024/1944.
2. LG 2021, *Linea guida per l'identificazione, la qualificazione e l'accettazione di barre e staffe in composito fibrorinforzato per uso strutturale*, Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Dicembre 2021.
3. I. Baran (2023). *Pultrusion: State-of-the-Art Process Models with Applications*, 2<sup>nd</sup> Ed., Elsevier Publ., ISBN: 978-0-32391-613-4.
4. AA.VV. (2000). *Pultrusion for Engineers*, T.F. Starr Ed., Woodhead Publ., ISBN: 978-1-85573-425-8.

**Tabella 11-2** – Ulteriori caratteristiche fisiche e meccaniche delle barre di FRP determinabili con prove sperimentali

N°	Caratteristica	Simbolo e unità di misura	Riferimento normativo
1	Resistenza a compressione (valore medio e caratteristico)	$f_{c,FRP}, f_{ck,FRP}$ [MPa]	EAD-barre FRP §2.2.3 LG-barre FRP – Tab. 2
2	Modulo a compressione longitudinale (valore medio)	$E_{c,FRP}$ [GPa]	EAD-barre FRP §2.2.3 LG-barre FRP – Tab. 2
3	Deformazione a rottura (valore medio e caratteristico)	$\varepsilon_{fit0}, \varepsilon_{fk0}$ [mm/mm]	EAD-barre FRP §2.2.2 LG-barre FRP – Tab. 2
4	Resistenza all'estrazione ( <i>pull-out</i> ) da supporto in calcestruzzo (valori medi): - Calcestruzzo C20/25, posizione centrata ( <i>condizioni alcaline</i> ) - Calcestruzzo C20/25, posizione eccentrica ( <i>condizioni standard</i> ) - Calcestruzzo C20/25, posizione centrata ( <i>massima temperatura di esercizio</i> ) - Calcestruzzo C50/60, posizione centrata ( <i>condizioni standard</i> )	$\tau_{b,a}$ [MPa] $\tau_{b,cb}$ [MPa] $\tau_{b,Tmax}$ [MPa] $\tau_{b,C50/60}$ [MPa]	EAD-barre FRP §2.2.4 LG-barre FRP – Tab. 2
5	Fatica a trazione ( $2 \cdot 10^6$ cicli, rapporto di tensione, $R = 0.1$ , frequenza 1-10 Hz)	$f_{fatigue}$ [MPa]	EAD-barre FRP §2.2.7 LG-barre FRP – Tab. 3
6	Fatica statica (valori caratteristici): Resistenza a rottura per creep ad un milione di ore (100 anni) ( <i>condizioni standard</i> ) Resistenza a rottura per creep ad un milione di ore (100 anni) ( <i>esposizione in ambiente alcalino a 60°</i> )	$f_{fk,c}$ [MPa] $f_{fk,ca}$ [MPa]	EAD-barre FRP §2.2.8 LG-barre FRP – Tab. 3
7	Coefficiente di dilatazione termica longitudinale	$\alpha_{sp,L}$ [°C <sup>-1</sup> ]	EAD-barre FRP §2.2.9 LG-barre FRP – Tab. 1
8	Coefficiente di dilatazione termica trasversale	$\alpha_{sp,T}$ [°C <sup>-1</sup> ]	EAD -barre FRP §2.2.10 LG-barre FRP – Tab. 1
9	Temperatura di fusione ( <i>barre di FRP in materiale termoplastico e semicristallino</i> )	$T_{pm}$ [°C]	EAD-barre FRP §2.2.11
10	Rilassamento: Tasso di rilassamento a 10, 120 e 1000 ore Tasso di rilassamento ad un milione di ore (100 anni)	$Y_{10}, Y_{120}, Y_{1000}$ [%] $Y_{million}$ [%]	EAD-barre FRP §2.2.12 LG-barre FRP – Tab. 3
11	Resistenza agli ambienti alcalini: Tasso di perdita di massa (a 1000 ore, a 3000 ore) Percentuale residua di resistenza media a trazione a 1000 ore sotto carico sostenuto Percentuale residua di resistenza media interlaminare a 1000 ore Percentuale residua di resistenza media interlaminare a 3000 ore	$R_{\Delta m}$ [%] $R_{et,i}^{1000}$ [%] $R_{et,i}^{1000}$ [%] $R_{et,i}^{3000}$ [%]	EAD-barre FRP §2.2.16 LG-barre FRP – Tab. 2
11	Reazione al fuoco	Classe	EAD-barre FRP §2.2.17 LG-barre FRP – Tab. 2

## 12 APPENDICE B: Calibrazione dei fattori parziali dei materiali

### 12.1 PREMESSA

Questa appendice contiene informazioni circa la procedura che è stata utilizzata per la calibrazione dei fattori parziali delle barre di FRP adottati nel Capitolo 4.

Il concetto di sicurezza si basa sulle indicazioni dell'EN 1990 [EN1990]. Nella definizione del valore di calcolo della generica proprietà di resistenza  $R_d$ , secondo la (4.3) riportata nel § 4.5.4, è indicata la distinzione tra il fattore parziale  $\gamma_{Rd}$  che copre le incertezze sul modello di resistenza e il fattore parziale  $\gamma_m$  che riguarda le incertezze sulle proprietà del materiale (considerando inizialmente  $\eta_T = \eta_a = \eta_{c,l} = 1$ ):

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R\{X_{d,i}; a_{n,i}\} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R\left\{\frac{X_{k,i}}{\gamma_m}; a_{n,i}\right\} \quad (12.1)$$

Per semplicità (come suggerito anche dall'EN 1990 §8.3.5.1(2)), i fattori parziali  $\gamma_m$  e  $\gamma_{Rd}$  possono essere combinati in un unico fattore parziale delle proprietà del materiale  $\gamma_f$  (EN 1990, § C.4.3):

$$\gamma_f = \gamma_{Rd} \cdot \gamma_m \quad (12.2)$$

dove, in definitiva:

- $\gamma_{Rd}$ : rappresenta il fattore parziale associato alle incertezze sul modello di resistenza e alle deviazioni geometriche, se non esplicitamente tenute in debito conto nel modello di resistenza;
- $\gamma_m$ : rappresenta il fattore parziale del materiale, che tiene conto, per quanto qui di interesse, della possibilità di una deviazione sfavorevole della proprietà del materiale dal suo valore caratteristico.

### 12.2 DERIVAZIONE DEL FATTORE PARZIALE DEL MATERIALE $\gamma_m$

Per la determinazione del fattore parziale del materiale, è stata condotta una indagine statistica sui risultati delle prove di resistenza a trazione, eseguite ai fini della qualificazione, di 8 diversi prodotti di produttori nazionali e non, sottoposti a prove in 5 differenti laboratori universitari nazionali ed internazionali, utilizzando la medesima metodologia di prova (EAD 260023-00-0301, §2.2.2).

Si sono analizzati campioni di diverso diametro di barre in GFRP assegnati alle classi di resistenza definite nel § 3.3.2 in funzione del valore caratteristico della resistenza a trazione e del valore medio del modulo elastico dei risultati dei singoli prodotti (Franco et al., 2025).

Si è osservato che la distribuzione statistica delle resistenze è ben approssimabile da una funzione log-normale a 3 parametri, soddisfacente il criterio di log-normalità di Kolmogorov-Smirnov (Massey, 1959). Adottando tale funzione per l'interpolazione dei dati sperimentali, i valori di progetto ed i valori caratteristici introdotti dall'Eurocodice 0 [EN 1990] si specializzano in:

$$\text{Resistenza di progetto:} \quad X_d = \vartheta + (\mu_X - \vartheta) \cdot e^{-\left[\frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\sigma_X^2}{(\mu_X - \vartheta)^2}\right) + \text{sign}(\gamma) \cdot \alpha_R \cdot \beta \cdot \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma_X^2}{(\mu_X - \vartheta)^2}\right)}\right]} \quad (12.3)$$

$$\text{Resistenza caratteristica:} \quad X_k = \vartheta + (\mu_X - \vartheta) \cdot e^{-\left[\frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\sigma_X^2}{(\mu_X - \vartheta)^2}\right) - \text{sign}(\gamma) \cdot \Phi^{-1}(p) \cdot \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma_X^2}{(\mu_X - \vartheta)^2}\right)}\right]} \quad (12.4)$$

in cui:

- $\mu_X$ ,  $\sigma_X$  e  $\mathcal{G}$  sono i parametri della distribuzione log-normale a 3 parametri (media e deviazione standard della variabile X e soglia, rispettivamente) e  $\gamma$  l'asimmetria,
- $\alpha_R$  è il fattore di sensibilità secondo il First Order Reliability Method (FORM);
- $\beta$  è il valore obiettivo dell'indice di affidabilità, funzione della classe di conseguenza della struttura e del periodo di ritorno (EN 1990);
- $\Phi$  rappresenta la funzione di probabilità cumulata della distribuzione normale standard e  $\Phi^{-1}(p)$  la relativa funzione quantile (per  $p=5\%$ ,  $\Phi^{-1}(p) = -1.645$ ).

Il valore  $\gamma_m$  sarà quindi dato da:

$$\gamma_m = \frac{X_k}{X_d} \quad (12.5)$$

A partire dal valore di progetto e dal valore caratteristico determinati con i parametri della distribuzione log-normale a 3 parametri calcolati per ciascun diametro sottoposto a prova, è stato calcolato il corrispondente fattore parziale  $\gamma_m$  per alcune classi di resistenza. Per il calcolo della resistenza di progetto, sono stati assunti i valori 0.8 per il fattore di sensibilità  $\alpha_R$  (in quanto X rappresenta una variabile legata alla resistenza (EN1990)) e 3.8 per l'indice di affidabilità obiettivo  $\beta$  (Classe di conseguenza CC2, periodo di ritorno di 50 anni) (EN1990, Tabella C.3), ottenendo valori di gamma  $\gamma_m$  variabili tra 1.02 e 1.06 al variare del diametro.

Si è, pertanto, assunto un fattore parziale del materiale pari a  $\gamma_m = 1.06$ .

### 12.3 DERIVAZIONE DEL FATTORE PARZIALE DELLE INCERTEZZE $\gamma_{Rd}$

Come d'uso per i fattori parziali che tengono conto di diverse incertezze, è possibile considerare il fattore parziale  $\gamma_{Rd}$  come prodotto di due termini, l'uno che tiene conto dell'incertezza sul modello di resistenza  $\gamma_{Rd,mod}$  e l'altro che tiene conto delle deviazioni geometriche  $\gamma_{Rd,geo}$ :

$$\gamma_{Rd} = \gamma_{Rd,mod} \cdot \gamma_{Rd,geo} \quad (12.6)$$

Le proprietà delle armature sono dominanti principalmente nella flessione; per tale motivo le incertezze sul modello e sulla geometria sono legate soprattutto alle applicazioni relative al rinforzo a flessione.

Per le barre di FRP, il fattore parziale per l'incertezza sul modello viene assunto dal MC2020 §17.8.1.1 (MC2020) pari ad  $\gamma_{Rd,mod} = 1.1$ , dato l'uso di modelli di resistenza convalidati per la progettazione.

Per il fattore che tiene conto delle deviazioni geometriche,  $\gamma_{Rd,geo}$ , è possibile fare le seguenti valutazioni. Le incertezze geometriche relative all'area di rinforzo sono implicitamente considerate nella variabilità della resistenza poiché quest'ultima è definita in base all'area effettiva della sezione trasversale. Per gli elementi soggetti a trazione pura, si può quindi ammettere che l'incertezza geometrica svanisca. Nel caso della flessione, dove la resistenza dipende anche dalle dimensioni della sezione trasversale e dalla posizione delle barre (tramite l'altezza utile e, quindi, il copriferro), le incertezze geometriche potrebbero, invece, avere un'influenza non del tutto trascurabile. Si può ipotizzare che tale fattore non dipenda dal materiale e può, quindi, essere assunto pari a quello utilizzato per l'acciaio, ovvero  $\gamma_{Rd,geo} = 1.05$  (MC2010).

Con queste ipotesi, si ottiene, quindi, che il fattore parziale delle incertezze  $\gamma_{Rd}$  per le barre di FRP è pari a:

$$\gamma_{Rd} = \gamma_{Rd,mod} \cdot \gamma_{Rd,geo} = 1.1 \cdot 1.05 = 1.16 \quad (12.7)$$

## 12.4 DERIVAZIONE DEL FATTORE PARZIALE PER LE BARRE DI FRP $\gamma_f$

A partire dalle valutazioni effettuate nei paragrafi precedenti, è possibile quindi determinare il fattore parziale per le barre di FRP come:

$$\gamma_f = \gamma_{Rd} \cdot \gamma_m = 1.16 \cdot 1.06 = 1.23 \quad (12.8)$$

A vantaggio di sicurezza si è deciso di assumere nelle presenti Istruzioni  $\gamma_f = 1.25$ , come riportato al punto (1) del § 4.6.

### **Bibliografia essenziale**

1. EN 1990:2023, *Eurocode - Basis of structural and geotechnical design*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
2. EAD 260023-00-0301, *Carbon, glass, basalt and aramid fibre reinforced polymer bars as reinforcement of structural elements*. 2019, EOTA, OJ Publication: Decision (EU) 2024/1944.
3. Massey FJ (1951) The Kolmogorov–Smirnov test for goodness of fit. *J Am Stat Assoc* 46(2539):68–78
4. *fib Bulletin 65, Model Code 2010 - Final draft, Vol 1*. 2012, CEB-FIP fib.
5. *fib Model Code for Concrete Structures (2020)*, CEB-FIP fib.
6. Franco, A., Ceroni, F., Bonati, A., Occhiuzzi, A. Partial factors for FRP rebars in reinforced concrete structures. *12th International Conference on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering*, CICE 2025 July 14-16, 2025 Lisbon, Portugal.

## 13 APPENDICE C: Compiti e responsabilità degli operatori nella scelta e nel controllo delle barre di FRP

### Fabbricanti

- La produzione delle barre di FRP, come quella dei singoli componenti (fibre e matrici), deve essere costantemente oggetto di piani di controllo della qualità.
- Nel caso di prodotti qualificati mediante marcatura CE, i Fabbricanti devono fornire la Dichiarazione di prestazione e conformità (DoPC, attualmente DoP) di cui al Regolamento UE 2024/3110 o altre certificazioni disponibili dei prodotti per assicurare la rispondenza di ogni lotto di fabbricazione con le specifiche dichiarate.
- Nel caso di prodotti qualificati mediante CVT, i Fabbricanti devono fornire il CVT e altra documentazione di accompagnamento alla fornitura dei prodotti, come ad esempio le schede tecniche.
- 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 secondo quanto indicato in Tabella 3-1 e specificandone la classe (Tabella 3-3).
- In base all'importanza e all'entità dell'applicazione, può suggerire al Direttore dei Lavori di eseguire delle prove per verificare alcune o tutte le caratteristiche geometriche, meccaniche e fisiche fornite dal Fabbricante nelle schede tecniche.

### Impresa appaltatrice

- Deve adottare le barre di FRP aventi le caratteristiche indicate dal Progettista, acquistate presso Fabbricanti che abbiano attuato il processo di qualificazione di cui al §11.1.
- Deve verificare che i prodotti siano accompagnati da schede tecniche esaurienti, riportanti i valori delle caratteristiche meccaniche e fisiche.
- Deve verificare, assieme al Direttore dei Lavori, 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 Fabbricante 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 controllando la Dichiarazione di prestazione e conformità (DoPC, attualmente DoP) di cui al Regolamento (UE) 2024/3130 nel caso di prodotti marcati CE o avvalendosi delle corrispettive certificazioni negli altri casi.
- Nel caso di prodotti qualificati mediante CVT, deve procedere con i controlli in accettazione come previsto dalle procedure riportate nella LG2021.
- Nel caso di prodotti qualificati mediante marcatura CE, si deve assicurare che il corrispondente Certificato di Costanza della Prestazione e di Conformità del prodotto (CCPC), rila-

sciato da idoneo organismo notificato, sia in corso di validità e che il prodotto arrivi in cantiere corredato della Dichiarazione di Prestazione e Conformità (DoPC, attualmente DoP). In tal caso, le procedure di accettazione previste nella LG2021 non sono necessarie e rimane sua facoltà eseguire o meno ulteriori prove per l'accettazione in cantiere secondo la Tabella 3-5.

#### 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 operare in conformità alla norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025 “Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e di taratura”.

#### Collaudatore

- Deve verificare la qualità dei materiali impiegati controllando la Dichiarazione di prestazione e conformità (DoPC, attualmente DoP) di cui al Regolamento (UE) 2024/3110 nel caso di prodotti marcati CE o 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.

## 14 APPENDICE D: Calibrazione su base sperimentale della formulazione per il calcolo della freccia in elementi inflessi di calcestruzzo armato con barre di FRP

Viene riportata di seguito la procedura che il Fabbrikante può seguire per definire in maniera più accurata mediante prove sperimentali l'influenza dell'aderenza di specifiche barre di FRP sul calcolo delle frecce di elementi inflessi in calcestruzzo armato con barre di FRP.

Per la valutazione delle frecce si fa riferimento alla seguente formula:

$$f = f_1 \cdot (1 - \gamma) + f_2 \cdot \gamma$$
$$\gamma = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^m \quad (14.1)$$

dove le quantità introdotte sono già state definite nel § 7.3.

Sulla base di una popolazione costituita da almeno cinque elementi di calcestruzzo armati con barre di FRP e sottoposti a prove di flessione su quattro punti, si misurano le frecce 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.

Considerando i dati sperimentali e le formulazioni analitiche della (15.1), è possibile calibrare i valori del coefficiente  $\beta_1$  e dell'esponente  $m$  mediante un'opportuna analisi statistica, quale ad esempio quella basata sul metodo della massima verosimiglianza.

In accordo con il § 7.3, il coefficiente  $\beta_2$  è da assumersi uguale a 1.0, considerando che i carichi applicati durante le prove sperimentali siano assimilabili a carichi di breve durata e a meno che il carico non sia applicato in modo ciclico; in quest'ultimo caso, il coefficiente  $\beta_2$  si porrà uguale a 0.5.

## 15 APPENDICE E: Il legame di aderenza barre di FRP-calcestruzzo

### 15.1 PREMESSA

Come descritto nel §5, la corretta collaborazione tra la barra di FRP ed il calcestruzzo è assicurata dal meccanismo di aderenza che si sviluppa tra di essi per il tramite di tensioni tangenziali lungo l'interfaccia barra di FRP – calcestruzzo. Il trasferimento delle tensioni tangenziali all'interfaccia tra una barra di FRP ed il calcestruzzo può essere descritto analiticamente da una legge di interfaccia  $\tau(s)$  (o 'legame di aderenza') che associa, allo scorrimento  $s$  (spostamento relativo tra barra e calcestruzzo), la corrispondente tensione tangenziale  $\tau$  agente sulla superficie di interfaccia. Tale legge dipende principalmente dalle proprietà meccaniche (moduli di elasticità normale e tangenziale, coefficiente di Poisson) e dalle caratteristiche geometriche (forma, diametro o dimensioni) delle barre, oltre che dal loro trattamento superficiale (sabbatura, presenza di scanalature, nervature, dentellature o risalti superficiali ottenuti con differenti tecnologie di produzione).

In Figura 15-1 si riportano alcuni esempi di barre di FRP presenti in commercio.



Figura 15-1. Esempi di diverse tipologie di barre di FRP presenti sul mercato.

Il legame di aderenza può essere ottenuto per via sperimentale attraverso specifiche prove, come descritto nel §5.3, ed in funzione del tipo di trattamento superficiale delle barre, esso può assumere forme diverse ed essere caratterizzato da valori massimi della tensione tangenziale,  $\tau_b$ , diversi. La crisi per aderenza della barra di FRP può, infatti, avvenire in corrispondenza della superficie di contatto barra – calcestruzzo (legame di aderenza basato principalmente sull'adesione chimico-fisica all'interfaccia barra-calcestruzzo) oppure con formazione di bielle compresse di calcestruzzo nell'intorno della barra (legame di aderenza basato sia sull'adesione chimico-fisica sia sull'ingranamento meccanico, *interlocking*), in funzione della sua finitura superficiale. Ciò si riflette, chiaramente, anche nelle formulazioni analitiche che devono rappresentare le leggi sperimentali. Premesso che il legame di aderenza barra di FRP-calcestruzzo può essere strettamente dipendente dalle specifiche proprietà geometriche e meccaniche della barra ed andrebbe, quindi, caratterizzato per ogni singola barra, nel seguito si riportano alcune formulazioni analitiche che forniscono indica-

zioni per la modellazione del legame di aderenza delle barre di FRP sia in termini di relazione  $\tau(s)$  sia di valore massimo della tensione tangenziale,  $\tau_b$ .

## 15.2 FORMULAZIONI TEORICHE PER IL LEGAME DI ADERENZA CALCESTRUZZO-BARRE DI FRP

Il modello analitico suggerito da (Eligehausen et al., 1983, *BEP model*), ideato per la modellazione del meccanismo di aderenza sviluppato da barre in acciaio ad aderenza migliorata, è stato successivamente modificato e ricalibrato in (Cosenza et al., 1996, *BEP modificato*) per meglio adattarlo al meccanismo di aderenza sviluppato da barre di FRP (Figura 15-1a) e riproposto in (Pecce et al., 2001) senza il tratto di tensione tangenziale residua (Figura 15-1b).

Diversamente da quanto avviene nel caso di barre in acciaio ad aderenza migliorata, per le barre di FRP, infatti, una volta raggiunta la massima resistenza, sperimentalmente spesso non è stato osservato un chiaro tratto orizzontale (plateau) prima della fase discendente, pertanto, in entrambe le opzioni proposte nelle Figure 15-2, dopo il valore di picco della tensione tangenziale si attiva un tratto di *softening* lineare.

Nel caso di legame con resistenza residua (Figura 15-2a), i tre rami sono definiti come segue:

$$\tau(s) = \tau_b \cdot \left( \frac{s}{s_b} \right)^\alpha \quad s \leq s_b \quad (15.1)$$

$$\tau(s) = \tau_b - p(s - s_b) \quad s_b < s \leq s_r \quad (15.2)$$

$$\tau(s) = \tau_r \quad s > s_r \quad (15.3)$$

$$\text{essendo } p = \frac{\tau_b - \tau_r}{s_r - s_b} \quad (15.4)$$

Nel caso di legame senza resistenza residua (Figura 15-1b), il primo ramo è dato dalla (15.1), mentre il secondo ramo è definito come:

$$\tau(s) = \tau_b - p(s - s_b) \quad s_b < s \leq s_u \quad (15.5)$$

$$\text{essendo } p = \frac{\tau_b}{s_u - s_b} \text{ e } \tau(s) = 0 \text{ per } s > s_u .$$

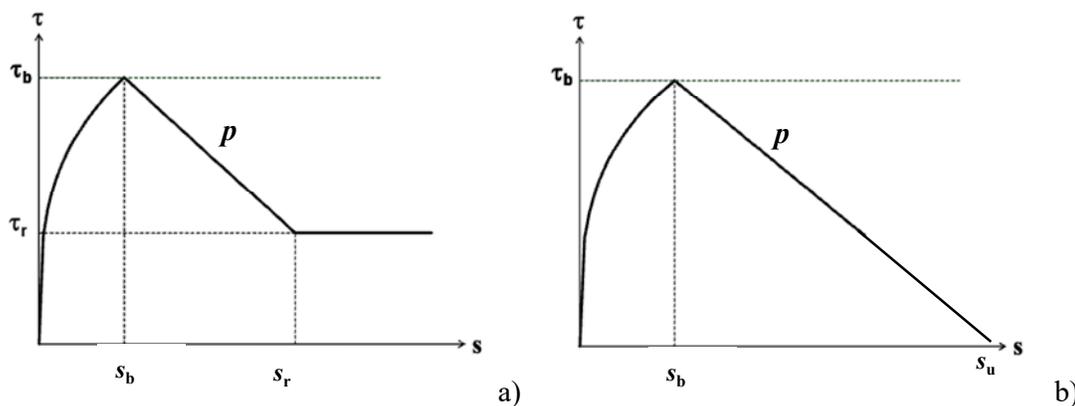


Figura 15-2. Legame di aderenza per barre di FRP: a) legame BEP modificato con resistenza residua; b) legame BEP modificato senza resistenza residua.

Il numero di parametri da identificare per la definizione del legame BEP modificato è cinque per il modello con tre rami:  $\tau_b, \tau_r, s_b, s_r, \alpha$  oppure, in alternativa,  $\tau_b, s_b, \alpha, p$  ed  $s_r$  (oppure  $\tau_r$ ). Nel caso del modello a due rami i parametri si riducono a quattro:  $\tau_b, s_b, \alpha$  e  $p$ .

Nel paragrafo successivo sono fornite delle indicazioni per il calcolo della tensione di aderenza  $\tau_b$  in relazione alla resistenza del calcestruzzo ed alla classe di aderenza come definita nel § 5.3.

Con riferimento al legame riportato in Figura 15-2b e rappresentato dalle (15.1) e (15.5), sulla base di indicazioni di letteratura, si suggeriscono due diversi intervalli di variazione per i valori dei parametri  $s_b, \alpha$  e  $p$ . Qualora il meccanismo di aderenza sia essenzialmente legato all'adesione chimico-fisica, come evidenziato nelle prove sperimentali riportate in Figura 15-3a, si suggerisce che tali valori siano fissati negli intervalli:  $s_b = 0.10 \div 0.35$ ;  $\alpha = 0.45 \div 0.50$ ,  $p = 0.01 \div 0.05$ . Qualora si sviluppi anche un meccanismo di ingranamento, come evidenziato nelle prove sperimentali riportate in Figura 15-3b, si suggerisce:  $s_b = 1.5 \div 1.75$ ;  $\alpha = 0.30 \div 0.45$ ,  $p = 0.10 \div 0.20$ .

Si osserva che, poiché  $\alpha \leq 1$ , per scorrimenti che tendono a zero la pendenza del primo tratto tende ad essere verticale.

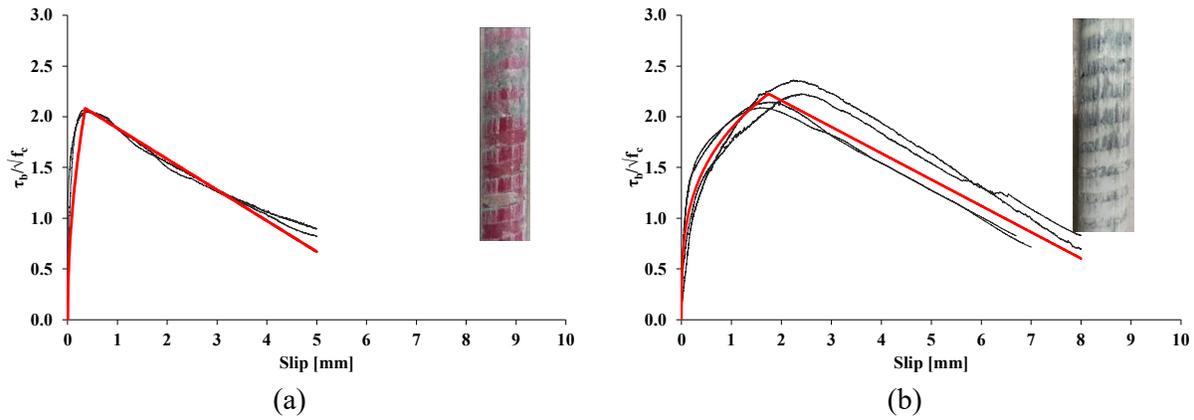


Figura 15-3. Legami di aderenza sperimentali e teorici ottenuti dalle (15.1), (15.2), (15.5): a) legame basato principalmente su adesione chimico-fisica; b) legame basato su ingranamento.

In (Cosenza et al., 1997; Focacci et al., 2020; Focacci et al., 2024) è proposto un modello leggermente diverso per il primo tratto della curva. La legge che descrive il ramo ascendente della curva tensione di aderenza-scorrimento, (Figura 15-3a) è, infatti, il seguente:

$$\tau(s) = \tau_b \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{s}{s_b}\right)\right)^\beta \quad \tau \leq \tau_b \quad (15.6)$$

Anche in questo caso, grazie ad una pendenza iniziale verticale del legame (per  $s = 0$ ), il modello è in grado di descrivere in maniera accurata il meccanismo iniziale di aderenza dovuto all'adesione chimica all'interfaccia barra-calcestruzzo. I 3 parametri da determinare per la completa definizione del legame sono, quindi:  $\tau_b, s_b$ , e  $\beta$ . Mentre per il valore di  $\tau_b$  si rimanda al paragrafo successivo, per gli altri due parametri si suggeriscono i seguenti intervalli:  $s_b = 1.70 \div 5.70$ ;  $\beta = 0.37 \div 1.17$ .

In Figura 15-4b, si riportano alcuni confronti tra legami di aderenza sperimentali ottenuti da prove di aderenza su barre in CFRP e GFRP nel tratto ascendente e la (15.6) in cui si sono assunti  $\tau_b = 16.6$  MPa,  $s_b = 4.14$  mm,  $\beta = 0.7$  (Leone, 2005).

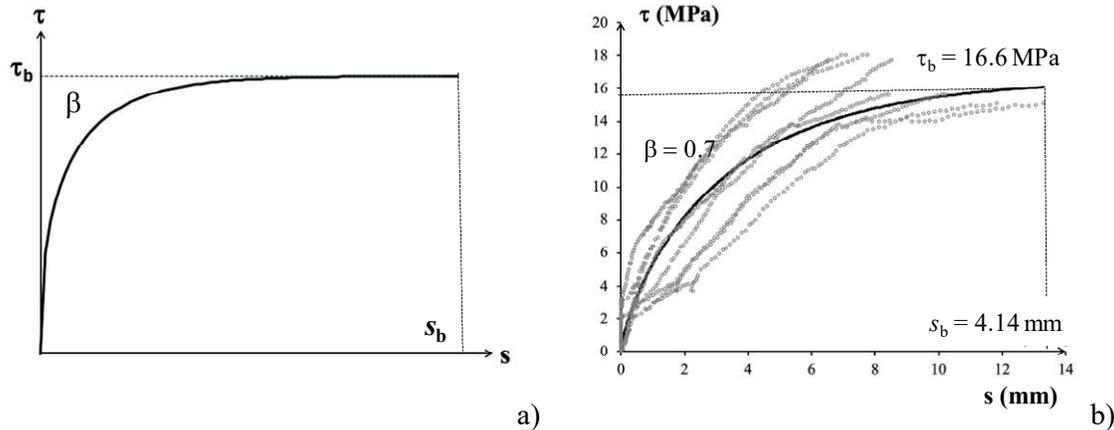


Figura 15-4. a) Tratto ascendente con andamento esponenziale per il legame di aderenza dato dalla (15.6); b) confronto tra legami di aderenza sperimentali e teorico dalla (15.6) (Leone, 2005).

### Bibliografia essenziale

1. Eligehausen R., Popov E. P., Bertero V. V., 1983. "Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations". Report (University of California, Berkeley. Earthquake Engineering Research Center), no. UCB/EERC 83/23
2. Cosenza E., Manfredi G., Realfonzo R., 1997. "Behavior and Modeling of bond of FRP rebars to concrete". Journal of materials in Civil Engineering 1(2):40-51. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(1997)1:2(40)
3. Cosenza E., Manfredi G., Realfonzo R., (1996). Bond characteristics and anchorage length of FRP rebars, Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Advanced Composites Materials in Bridge Structures, M el Brady Ed.
4. Pecce M. Manfredi G., Relafonzo R., Cosenza E. (2001) Experimental and Analytical Evaluation of Bond Properties of GFRP Bars, Journal of Materials in Civil Engineering, DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:4(282).
5. Leone M. "Interface analysis of FRP (Fiber Reinforced Polymer) reinforced concrete elements" Thesis for the degree of Doctor of Materials Engineering- XVII Cycle, Department of Innovation Engineering University of Lecce, a.a. 2004-2005.
6. Focacci F., Nanni A., Bakis C. E. 2000. Local Bond-Slip Relationship for FRP Reinforcement in Concrete. Journal of Composites for Construction, 4(1): 24-31. Doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2000)4:1(24)
7. Focacci F., Rahman M. M., D'Antino T., Carloni C. 2024. FRP Strips Externally Bonded to Quasi-Brittle Substrates: Discussions and Advances of Open Research Topics. Journal of Composites for Construction 28(6): 04024055. Doi: 10.1061/JCCOF2.CCENG-4603.

### 15.3 VALUTAZIONE DELLA TENSIONE MASSIMA DI ADERENZA

La tensione di picco del legame di aderenza,  $\tau_b$ , può essere ottenuta da prove sperimentali di aderenza su lunghezze di barra pari a 5 volte il diametro effettivo della barra, come riportato nel 5.3.

In letteratura e in diverse linee guida di progettazione sono fornite formulazioni per la stima della tensione  $\tau_b$  in funzione essenzialmente del diametro della barra e della resistenza a compressione del calcestruzzo (Tighiouart et al. 1998, Okelo et al. 2005, Lee et al. 2008, *fib* Model Code 2020).

Sono stati esaminati i risultati di un esteso database di prove sperimentali (570 prove) di aderenza (pull-out) eseguite su barre di FRP di diverse tipologie (per trattamento superficiale, per fibre, per diametro) immerse in calcestruzzo con resistenza  $f_{cm}$  variabile tra 22 MPa e 80 MPa con lunghezze aderenti pari a 5 volte il diametro della barra.

I risultati sono stati esaminati in termini di valori sperimentali di tensione tangenziale di picco, ipotizzando costante lungo la lunghezza aderente  $\ell_b = 5d_{\text{eff}}$ , e pertanto  $\tau_b = \frac{F_{\text{max}}}{\pi d_{\text{eff}} \cdot \ell_b}$ .

Sono state quindi trovate le seguenti leggi di correlazione, separando i dati in funzione delle due classi di qualità dell'aderenza:

$$\text{Classe 1 - } \tau_b > 15\text{MPa} : \tau_b = 3.2 \cdot \sqrt{f_{\text{cm}}} \quad (15.7a)$$

$$\text{Classe 2 - } 7\text{MPa} \leq \tau_b \leq 15\text{MPa} : \tau_b = 2.2 \cdot \sqrt{f_{\text{cm}}} \quad (15.7b)$$

In Figura 15-5, si riportano i confronti tra i valori sperimentali e previsti dalle leggi sopra riportate (15-7) di  $\tau_b$ , distinti per le due classi di aderenza.

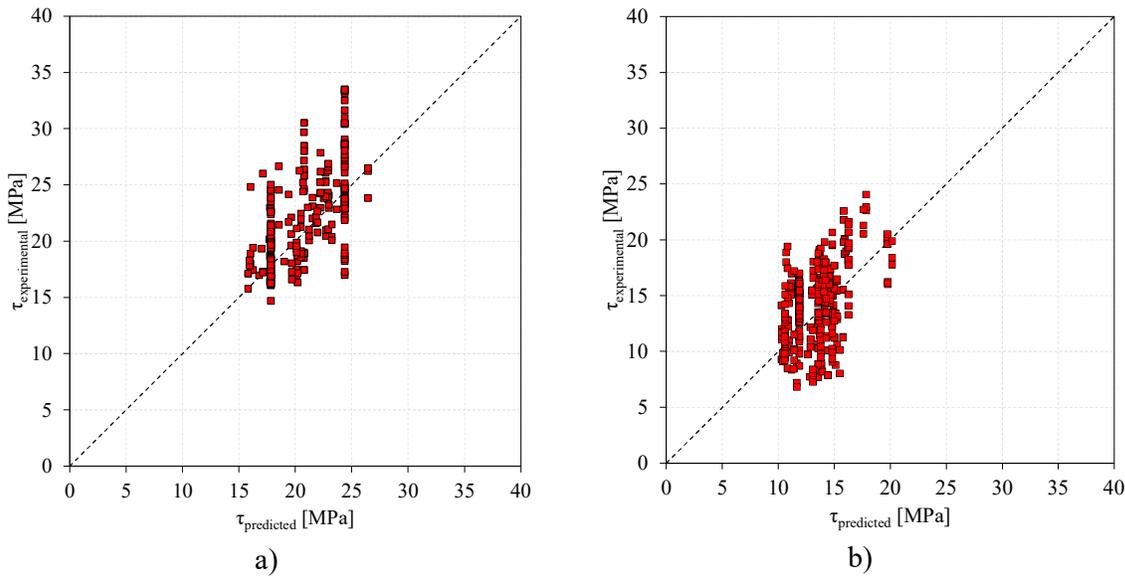


Figura 15-5. Confronto tra valori sperimentali e teorici dati dalle (16-7) per la tensione di aderenza di picco: a) Classe 1; b) Classe 2.

In alcune formule presenti in letteratura e in codici normativi, la tensione tangenziale dipende anche dalla lunghezza di aderenza della barra,  $\ell_b$  (Xue et al. 2016; Basaran et al. 2020; Sun-Jae Yoo et al. 2022; Wang et al. 2024; ACI 440.11-22). Tali formulazioni sono state calibrate sulla base dei risultati di prove di aderenza su barre con diverse lunghezze di aderenza e calcolando sempre la tensione tangenziale media in corrispondenza del carico massimo sperimentale. Esse, tuttavia, devono intendersi come indicazione predittive della tensione tangenziale media agente lungo la barra  $\tau_b$ , nell'ipotesi semplificata di distribuzione costante delle tensioni di aderenza, da adottarsi eventualmente ai fini del calcolo della lunghezza di ancoraggio necessaria per raggiungere un fissato valore,  $\sigma_f$ , di tensione normale nella barra attraverso l'espressione:

$$\ell_b = \frac{A_b \cdot \sigma_f}{\pi d_{\text{eff}} \cdot \tau_b} \quad (15.8)$$

Delle modalità di calcolo della lunghezza di ancoraggio si tratterà in dettaglio nel successivo §15.3.

### Bibliografia essenziale

1. ACI Committee 440 (2022). ACI CODE 440.11-22 Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Bars, American Concrete Institute, Farmington Hills MI.
2. Basaran, B. and Kalkan, I., 2020. Development length and bond strength equations for FRP bars embedded in concrete. *Composite Structures*, 25.
3. *fib* (2024). *fib Model Code for Concrete Structures (2020) v1.2*. Model Code. 780 pp. ISBN: 978-2-88394-175-5.
4. Lee, J.Y., Kim, T.Y., Kim, T.J., Yi, C.K., Park, J.S., You, Y.C. and Park, Y.H., 2008. Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete. *Composites Part B: Engineering*, 39(2), pp.258-270.
5. Okelo, R., & Yuan, R. L. (2005). Bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete. *Journal of composites for construction*, 9(3), 203-213.
6. Tighiouart, B., Benmokrane, B. and Gao, D., 1998. Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars. *Construction and building materials*, 12(8), pp.453-462.
7. Wang, J., Xiao, F., Lai, Z., Yang, J. and Tian, S., 2024, January. Bond of FRP bars with different surface characteristics to concrete. In *Structures* (Vol. 59, p. 105731). Elsevier
8. Xue, W., Yang, Y., Zheng, Q. and Fang, Z., 2016. Modeling of bond of sand-coated deformed glass fibre-reinforced polymer rebars in concrete. *Polymers and Polymer Composites*, 24(1), pp.45-56.

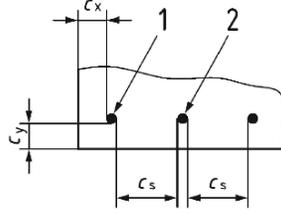
### 15.4 LUNGHEZZA DI ANCORAGGIO

La valutazione della lunghezza di ancoraggio per barre di FRP è stata condotta seguendo la procedura proposta nel documento esplicativo (CEN/TC 250/SC 2 N2087) dell'Eurocodice 2 (EN 1992-1-1, 2024) per le armature metalliche. Per gli elementi di c.a. con armature metalliche, il valore di progetto della lunghezza di ancoraggio,  $\ell_a$ , per barre dritte è stimato con la seguente formulazione:

$$\ell_a = k_\ell \cdot k_{cp} \cdot \phi \cdot \left( \frac{\sigma_{sd}}{435} \right)^{3/2} \cdot \left( \frac{25}{f_{ck}} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{\phi}{20} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{1.5d_b}{c_d} \right)^{1/2} \geq 10\phi \quad (15.9)$$

in cui:

- $\phi$  è il diametro della barra di acciaio;
- $\sigma_{sd}$  è la tensione di progetto agente nella barra di acciaio;
- $f_{ck}$  è il valore caratteristico della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo;
- $k_\ell$  è un coefficiente tarato su base statistica: è pari a 50 per condizioni di progetto relative ad azioni permanenti e variabili o 35 per condizioni di progetto relative ad azioni eccezionali;
- $k_{cp}$  è un coefficiente che tiene conto dell'effetto della posizione della barra nel getto sul meccanismo di aderenza: è assunto in (EN 1992-1-1, 2024) pari a 1.0 per condizioni di buona aderenza (definite in base all'inclinazione della barra rispetto all'asse orizzontale o alla distanza delle barre dal fondo della cassaforma o dalla superficie libera) e pari a 1.2 per condizioni di scarsa aderenza (quando non sono rispettati i requisiti per la buona aderenza o in caso di cassaforma scorrevole).
- $c_d = \min(c_x, c_y, 0.5c_s, 3.75d_b)$  essendo le distanze  $c_x$ ,  $c_y$  e  $c_s$  indicate in Figura 15.6;


 Figura 15-6. Grandezze per la definizione di  $c_d$ 

La formula (15.9) è stata ottenuta mediante inversione della seguente formula di regressione della tensione agente nella barra in funzione della lunghezza aderente e dei termini adimensionali

$$\left(\frac{f_{ck}}{25}\right), \left(\frac{25}{\phi}\right), \left(\frac{c_d}{\phi}\right):$$

$$\sigma_{sd} = 54 \cdot \left(\frac{\ell_a}{\phi}\right)^{11/20} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{25}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{25}{\phi}\right)^{1/5} \cdot \left(\frac{c_d}{\phi}\right)^{1/4} \quad (15.10)$$

Sulla base di un esteso database di prove sperimentali (circa 870 prove) di aderenza (pull-out) eseguite su barre di FRP di diverse tipologie (per trattamento superficiale, per fibre, per diametro) immerse in calcestruzzo con resistenza  $f_{ck}$  variabile tra 15 MPa e 90 MPa, la (16.10) è stata ricalibrata per le due classi di aderenza definite nel § 5.3.

In particolare, sono stati raccolti 560 dati relativi a prove di barre di FRP classificabili come classe di aderenza 1 e 310 dati di barre di FRP classificabili come classe di aderenza 2; in entrambi i gruppi le prove sono state realizzate su lunghezze di aderenza variabili (da un minimo di  $2.5d_{eff}$  ad un massimo di  $40d_{eff}$ , essendo  $d_{eff}$  il diametro effettivo della barra di FRP).

Trattandosi di prove di aderenza, non è stato possibile stimare il contributo del termine  $\left(\frac{1.5d_{eff}}{c_d}\right)$  nella (15.9), per cui si è proceduto a valutare, attraverso una procedura multivariata di regressione sui dati sperimentali, gli esponenti dei termini  $\left(\frac{f_{ck}}{25}\right), \left(\frac{20}{d_{eff}}\right), \left(\frac{\ell_a}{d_{eff}}\right)$  da cui si è fatta dipendere la tensione di lavoro nella barra di FRP, ottenendo le espressioni sotto riportate:

- Per la **Classe 1**:  $\tau_b > 15$  MPa:

$$\sigma_{fd} = k \cdot \left(\frac{\ell_a}{d_{eff}}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{25}\right)^{2/5} \cdot \left(\frac{20}{d_{eff}}\right)^{1/5} \quad (15.11)$$

$$\ell_a = k_\ell \cdot d_b \cdot \left(\frac{\sigma_{fd}}{500}\right)^2 \cdot \left(\frac{25}{f_{ck}}\right)^{4/5} \cdot \left(\frac{d_{eff}}{20}\right)^{2/5} \quad k_\ell = \left(\frac{500}{k}\right)^2 \quad (15.12)$$

- Per la **Classe 2** ( $7 \text{ MPa} < \tau_b < 15 \text{ MPa}$ ):

$$\sigma_{fd} = k \cdot \left(\frac{\ell_a}{d_{eff}}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{25}\right)^{2/5} \cdot \left(\frac{20}{d_{eff}}\right)^{1/5} \quad (15.13)$$

$$\ell_a = k_\ell \cdot d_b \cdot \left(\frac{\sigma_{fd}}{500}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{25}{f_{ck}}\right)^{3/5} \cdot \left(\frac{d_{eff}}{20}\right)^{3/10} \quad k_\ell = \left(\frac{500}{k}\right)^{3/2} \quad (15.14)$$

Nelle (15.11)-(15.14), i simboli hanno il significato introdotto in precedenza a meno della  $\sigma_{fd}$  che è la massima tensione (tensione di progetto) applicabile nella barra di FRP per una data lunghezza di ancoraggio,  $\ell_a$ , e di  $k$  e  $k_\ell$  che sono coefficienti tarati sulla base dei dati sperimentali.

Il best fitting sui dati sperimentali della tensione nella barra ha permesso di stimare il valore medio del coefficiente  $k_\ell$ , mentre attraverso la procedura di ‘*design by testing*’ suggerita in EN 1990 (Eurocodice 0) sono stati stimati i valori frattili al 5% (valore caratteristico) e allo 0.1% (valore di progetto), come riportato in Tabella 15-1.

Tabella 15-1. Valori medi, caratteristici e di progetto del coefficiente  $k_\ell$

$k_\ell$	Medio	5%	design	CoV	N° dati	$f_{cm}$ [MPa]
Classe 1	12.5	20.0	30.0	0.14	311	22-80
Classe 2	20.0	37.5	65.0	0.24	560	26-77

In Figura 15-7a e 15-7b si riportano i confronti tra i valori sperimentali della tensione di trazione nella barra di FRP ottenuti nelle prove di aderenza ed i valori predetti per la classe 1 secondo la (15.11) e per la classe 2 secondo la (15.13).

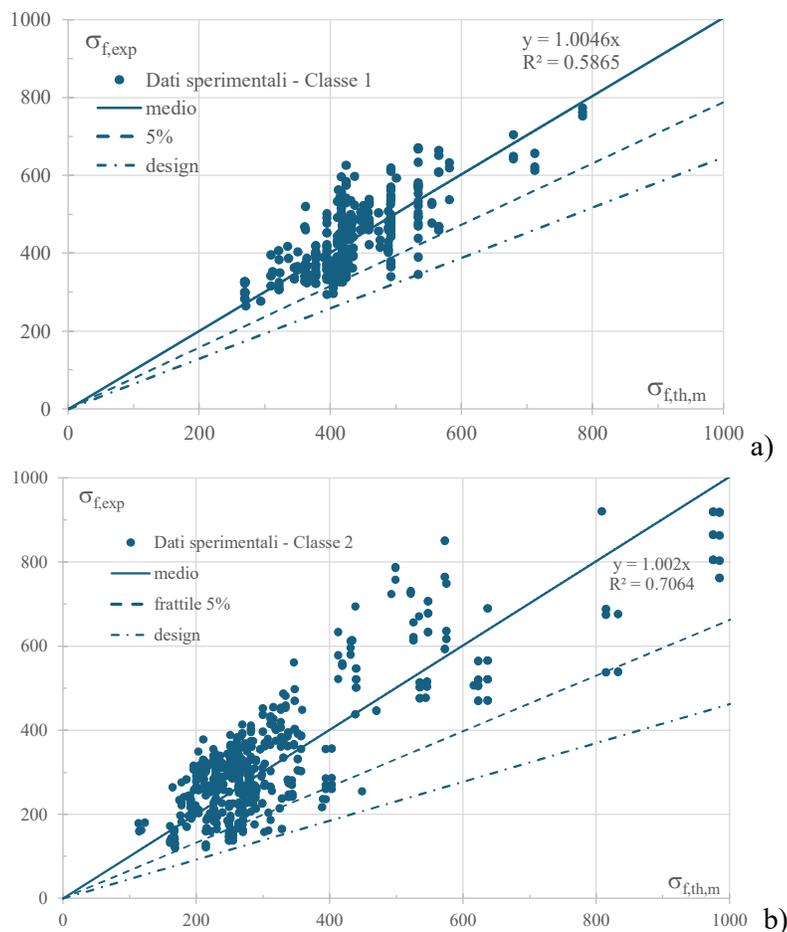


Figura 15.7. Confronto tra valori sperimentali della tensione di trazione nella barra di FRP in prove di aderenza e valori predetti: a) classe 1, Eq. (15.11); b) classe 2, Eq. (15.13).

Ai fini progettuali, nelle (15.11)-(15.14), si utilizzerà il diametro nominale  $d_b$  delle barre al posto di quello effettivo  $d_{eff}$  delle barre utilizzate per la calibrazione.

Le relazioni (15.12) e (15.14) sono diagrammate in Figura 15-8a e Figura 15-8b per le barre di classe 1 e di classe 2, rispettivamente, in termini di lunghezza di ancoraggio adimensionalizzata rispetto al diametro della barra ed in particolare i valori medi (m), caratteristici (k) e di progetto (d). Le formule sono state applicate assumendo  $f_{ck} = 20$  MPa e  $\sigma_{fd} = 512$  MPa (ottenuta a titolo di esempio

come  $\sigma_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \eta_T \cdot \eta_a \cdot \eta_{c,l} = \frac{1000}{1.25} 1.0 \cdot 0.8 \cdot 0.8 = 512$  MPa).

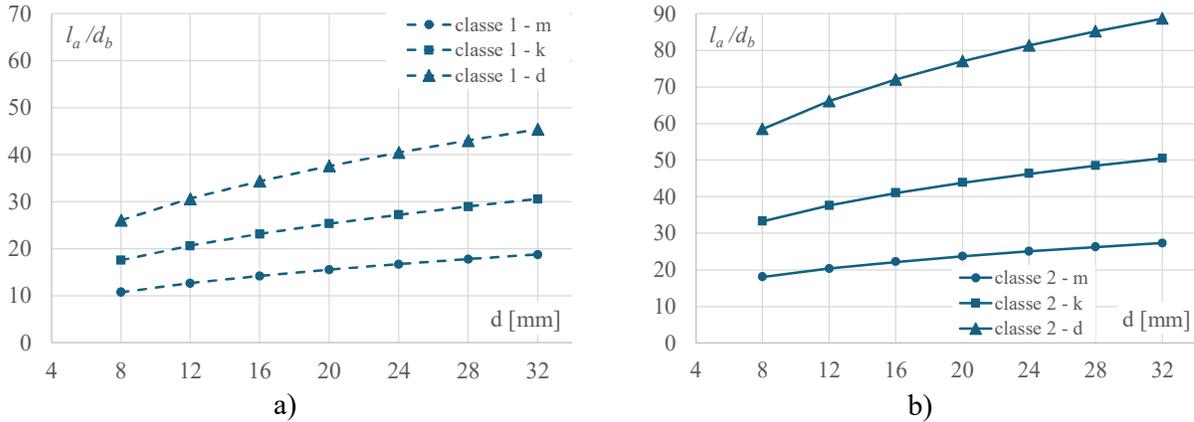


Figura 15-8. Variazione di  $l_a/d_b$  al variare del diametro della barra per  $f_{ck}=20$  MPa e  $\sigma_{fd} = 512$  MPa: a) classe 1, Eq. (15.12); b) classe 2, Eq. (15.14).

Nelle Figure 15-9, le stesse curve sono riportate assumendo  $f_{ck} = 30$  MPa e  $\sigma_{fd} = 512$  MPa.

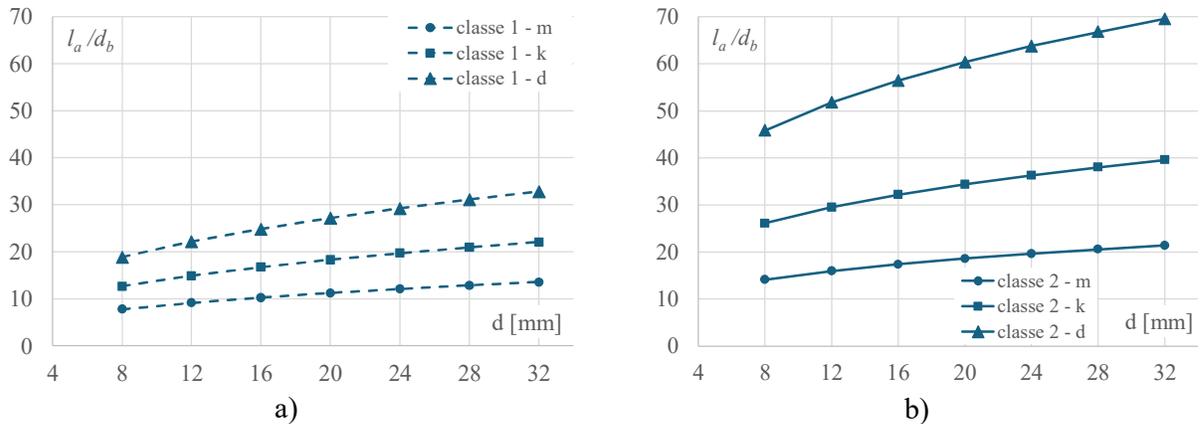


Figura 15-9. Variazione di  $l_a/d_b$  al variare del diametro della barra per  $f_{ck}=30$  MPa e  $\sigma_{fd} = 512$  MPa: a) classe 1, Eq. (15.12); b) classe 2, Eq. (15.14).

La relazione (15.14) è diagrammata in Figura 15-10 per le barre di classe 2 per  $f_{ck} = 30$  MPa e  $\sigma_{fd} = 410$  MPa (ottenuta a titolo di esempio come  $\sigma_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \eta_T \cdot \eta_a \cdot \eta_{c,l} = \frac{800}{1.25} 1.0 \cdot 0.8 \cdot 0.8 = 410$  MPa) ed è confrontata con la (15.9) nel caso di barre di acciaio, la stessa  $f_{ck}$  e per  $\sigma_s = 440/1.1 = 383$  MPa. Si osserva che la relazione  $l_a/d_b$  vs.  $d_b$  per la barra di FRP di classe 2 è di poco inferiore a quella della barra di acciaio, mentre la barra di FRP di classe 1 presenta lunghezze di ancoraggio sensibilmente minori.

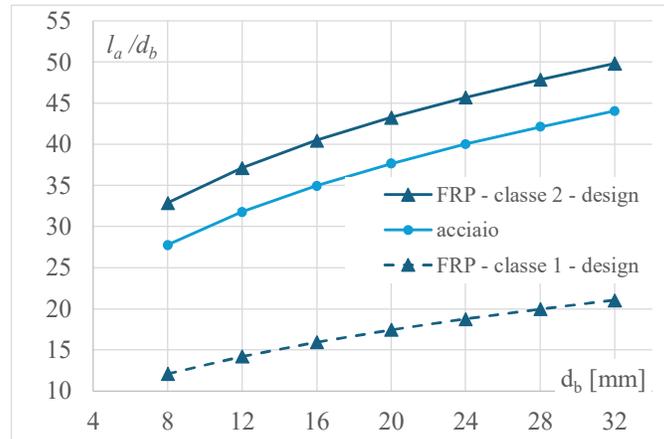


Figura 15-10. Variazione di  $l_a/d_b$  al variare del diametro della barra di FRP per  $f_{ck}=30$  MPa e  $\sigma_{fd}=410$  MPa per la classe 1 (Eq. 15.12) e la classe 2 (Eq. 15.14) e per barre di acciaio alla tensione  $\sigma_{sd}=383$  MPa (Eq. 15.9).

Se si vuole garantire che la barra di FRP lavori alla tensione  $\sigma_{fd}$ , la lunghezza di ancoraggio non deve essere comunque inferiore al massimo tra 300 mm e  $20 d_b$  per qualsiasi valore del diametro e qualsiasi classe di aderenza.

Le (15.12) e (15.14) non tengono conto, come si è detto, dell'effetto del copriferro in quanto sono state calibrate su prove di aderenza in cui la crisi è avvenuta per pull-out. È possibile tenere in conto l'effetto dello spessore del copriferro nelle formulazioni (16.12) e (16.14) aggiungendo il fattore

moltiplicativo  $\left(\frac{1.5d_b}{c_d}\right)^{1/2}$ , in analogia con quanto viene suggerito per la lunghezza di ancoraggio

delle barre di acciaio in (EN 1992-1-1, 2024), purché risulti  $> 1$ .

Infine, è possibile introdurre anche il termine legato alla posizione della barra nel getto tramite il coefficiente  $k_{cp}$  che tiene conto dell'effetto della posizione della barra nel getto sul meccanismo di aderenza secondo quanto indicato in (EN 1992-1-1, 2024) per le barre di acciaio.

### Bibliografia essenziale

1. CEN/TC 250/SC 2 N2087, Background document EN 1992-1-1, Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures.
2. EN 1990:2023, Eurocode - Eurocode - Basis of structural and geotechnical design. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
3. EN 1992-1-1:2024, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

## 15.5 CALIBRAZIONE SU BASE SPERIMENTALE DELLA LEGGE DI ADERENZA DI BARRE DI FRP

Definita un'equazione per la legge di interfaccia  $\tau(s)$ , i parametri che compaiono in essa possono essere ottenuti da risultati di prove di pull-out (Figura 5.2). Ognuna di queste prove fornisce una successione di valori di scorrimento all'estremo caricato,  $g_1, g_2, \dots, g_n$ , una successione di forze applicate,  $P_1, P_2, \dots, P_n$  e una successione di scorrimenti all'estremo libero,  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  (allo scorrimento  $g_j$  dell'estremo caricato corrispondono la forza applicata  $P_j$  e lo scorrimento dell'estremo libero  $\delta_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ ).

Al fine di determinare i parametri di una legge di interfaccia  $\tau(s)$  possono essere utilizzati due criteri, denominati nel seguito criterio 1 e criterio 2.

Entrambi i criteri utilizzano gli scorrimenti  $g_j$  valutati in corrispondenza dell'estremo caricato e gli scorrimenti  $\delta_j$  misurati in corrispondenza dell'estremo libero. Prima dell'utilizzo di questi risultati sperimentali è opportuno un controllo della loro coerenza verificando la seguente diseuguaglianza (Zhao et al. 2022):

$$g_j - \delta_j < \frac{P_j \ell_b}{E_f A_f} \quad (15.15)$$

nella quale il primo membro è l'allungamento della parte barra, di lunghezza  $\ell_b$ , aderente al calcestruzzo ed il secondo membro è l'allungamento della stessa parte di barra se lo sforzo normale fosse costante e pari alla forza  $P_j$  applicata.

### Criterio 1

Questo criterio si basa sull'ipotesi che lo scorrimento  $s$  e la tensione tangenziale  $\tau$  siano costanti all'interfaccia tra barra e calcestruzzo nella lunghezza aderente  $\ell_b$ . Sotto questa ipotesi, ad ogni punto della risposta sperimentale possono essere associati lo scorrimento

$$s_j = \frac{g_j + \delta_j}{2} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (15.16)$$

e la tensione tangenziale

$$\tau_{bj} = \frac{P_j}{\pi d_{\text{eff}} \cdot \ell_b} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (15.17)$$

nella quale  $d_{\text{eff}}$  è il diametro effettivo della barra e  $\ell_b$  è la lunghezza della superficie di interfaccia barra-calcestruzzo. Qualora siano disponibili solo gli scorrimenti  $g_j$  o solo gli scorrimenti  $\delta_j$ , in coerenza con l'ipotesi di costanza dello scorrimento lungo  $\ell_b$ , è possibile assumere  $s_j = g_j$  o  $s_j = \delta_j$ .

I parametri che compaiono nella legge di interfaccia  $\tau(s)$  vengono determinati minimizzando la differenza  $d(\mathbf{p})$  tra le tensioni tangenziali sperimentali  $\tau_j$  e le tensioni tangenziali teoriche  $\tau(s_j)$  fornite dalla legge di interfaccia. Per la valutazione di questa distanza si può usare il criterio dei minimi quadrati ed i parametri vengono, quindi, ottenuti minimizzando la seguente differenza:

$$d(\mathbf{p}) = \sum_{j=1}^n [\tau_j - \tau(s_j)]^2 \quad (15.18)$$

nella quale  $\mathbf{p}$  è un vettore che raccoglie i parametri cercati.

Assumendo la legge di aderenza di Figura 16-1b, si avrà  $\mathbf{p} = [s_b, \tau_b, \alpha, p]$ .

La Figura 15-11 mostra due esempi di determinazione dei parametri della legge di interfaccia sulla base di risultati di prove di pull-out utilizzando il criterio 1.

Si osserva che i risultati che si ottengono utilizzando questo criterio sono fortemente dipendenti dalla lunghezza  $\ell_b$  adottata nelle prove, pertanto l'utilizzo di una legge di interfaccia così ottenuta de-

ve essere attentamente considerato. Frequentemente la legge  $\tau(s)$  che si ottiene con questo criterio fornisce stime in eccesso delle tensioni tangenziali di interfaccia.

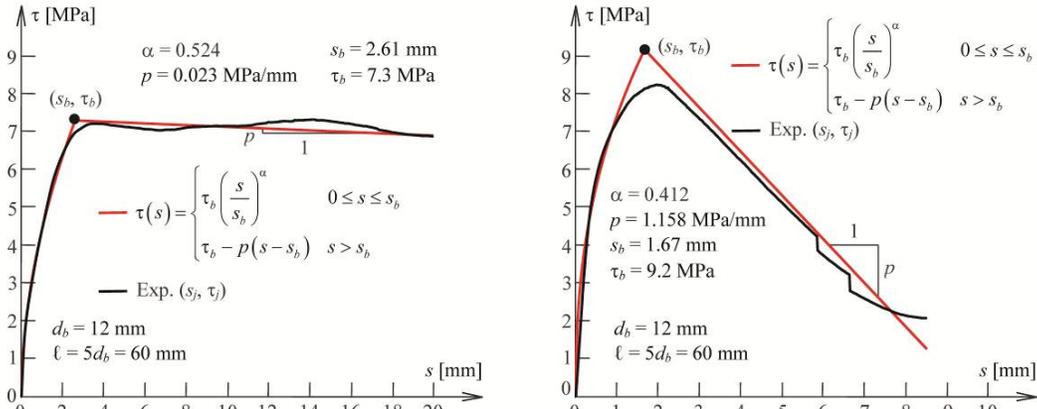


Figura 15-11. Esempi di applicazione del criterio 1 relativamente a due barre di GFRP di diametro 12 mm con diversa lunghezza aderente: a)  $\ell_b = 480$  mm ( $40d_{eff}$ ), b)  $\ell_b = 240$  mm ( $20d_{eff}$ ).

Criterio 2

Questo criterio (Focacci et al., 2000) si basa sulla determinazione delle funzioni  $P(g)$  e  $P(\delta)$  che associano rispettivamente uno scorrimento  $g$  all’estremo caricato ed uno scorrimento  $\delta$  all’estremo libero alla forza applicata  $P$  in una prova di pull-out. Queste funzioni vengono determinate sulla base della legge  $\tau(s)$  della quale si determinano i parametri e considerando la lunghezza  $\ell_b$  adottata nelle prove di pull-out. Di conseguenza le funzioni  $P(g)$  e  $P(\delta)$  contengono gli stessi parametri  $\mathbf{p}$  che definiscono la legge  $\tau(s)$ .

I parametri  $\mathbf{p}$  vengono determinati minimizzando la distanza  $d_g(\mathbf{p})$  tra le forze  $P_j$  misurate sperimentalmente e le forze  $P(g_j)$  associate dalla funzione  $P(g)$  agli scorrimenti misurati  $g_j$  oppure minimizzando la distanza  $d_\delta(\mathbf{p})$  tra le forze  $P_j$  misurate sperimentalmente e le forze  $P(\delta_j)$  associate dalla funzione  $P(\delta)$  agli scorrimenti misurati  $\delta_j$ . In alternativa si può definire una distanza che tiene conto simultaneamente delle distanze  $d_g(\mathbf{p})$  e  $d_\delta(\mathbf{p})$ . In tutti i casi le distanze possono essere definite dal criterio dei minimi quadrati.

Le funzioni  $P(g)$  e  $P(\delta)$  possono essere determinate risolvendo l’equazione differenziale:

$$\frac{d^2}{dy^2}s(y) = \frac{\pi d_{eff}}{E_f \cdot A_f} \tau[s(y)] \tag{15.19}$$

la cui incognita è il profilo degli scorrimenti di interfaccia  $s(y)$ . Nella (15.19),  $y$  è un asse di riferimento avente la direzione della barra,  $s(y)$  è lo scorrimento all’ascissa  $y$ ,  $\tau[s(y)]$  è la tensione tangenziale associata dalla legge  $\tau_b(s)$  allo scorrimento  $s(y)$ ,  $E_f$  è il modulo elastico della barra ed  $A_f$  è l’area della sua sezione trasversale.

La possibilità di determinare in forma chiusa le funzioni  $P(g)$  e  $P(\delta)$  dipende dalla forma prescelta dell’equazione della legge  $\tau(s)$ . In molti casi non è possibile determinare in forma chiusa le funzioni  $P(g)$  e  $P(\delta)$  ed è necessario procedere per via numerica. Si delinea nel seguito un procedimento che consente di determinare queste funzioni per punti.

La Figura 15-12 mostra due esempi di determinazione dei parametri della legge di interfaccia sulla base di risultati di prove di pull-out utilizzando il criterio 2.

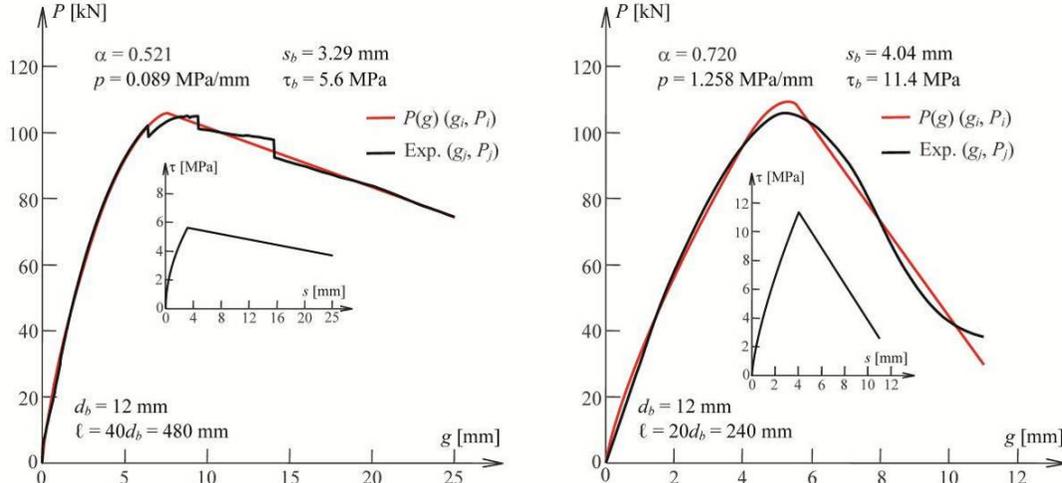


Figura 15-12. Esempi di applicazione del criterio 2 relativamente a due barre di GFRP con diversa lunghezza aderente: a)  $\ell_b = 480$  mm ( $40d_{eff}$ ), b)  $\ell_b = 240$  mm ( $20d_{eff}$ ).

Si considera una successione crescente  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_k$  di scorrimenti all'estremo libero, con  $\delta_1 = 0$ . Assumendo l'origine dell'asse  $y$  in corrispondenza dell'estremo libero, per ognuno di questi scorrimenti la (16.19) può essere risolta numericamente con le condizioni al contorno:

$$\begin{cases} s(0) = \delta_i \\ \varepsilon_f(0) = \left. \frac{ds}{dy} \right|_0 = 0 \end{cases} \quad (15.20)$$

Ad ogni scorrimento  $\delta_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) restano così associati un profilo di scorrimenti  $s_i(y)$  ed un profilo di sforzi assiali nella barra:

$$N_i(y) = E_f A_f \frac{d}{dy} s_i(y) \quad (15.21)$$

Ad ogni scorrimento dell'estremo libero  $\delta_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) vengono quindi associati lo scorrimento dell'estremo caricato  $g_i = s_i(\ell_b)$  e la forza i pull-out  $P_i = N_i(\ell_b)$ . Le coppie  $(\delta_i, P_i)$  sono punti del grafico della funzione  $P(\delta)$  mentre le coppie  $(g_i, P_i)$  sono punti del grafico della funzione  $P(g)$ .

Dipendentemente dalla forma della legge  $\tau_b(s)$ , può accadere che lo scorrimento dell'estremo libero rimanga nullo fino a che la forza  $P$  non raggiunge un certo valore  $\bar{P}$  (questo accade, ad esempio, se la derivata della funzione  $\tau(s)$  tende ad infinito per  $s$  tendente a zero o se la funzione  $\tau(s)$  è caratterizzata da  $\tau(0) = \tau_0 \neq 0$  (Focacci et al. 2024)). Se questo accade, la funzione  $P(\delta)$  è caratterizzata da  $P(0) = \bar{P} > 0$  e il procedimento delineato non consente di determinare la funzione  $P(g)$  per  $P < \bar{P}$ . In questi casi il primo tratto della funzione  $P(g)$ , fino a  $P = \bar{P}$ , può essere determinato con la relazione:

$$P(g) = \sqrt{2\pi d_b E_f A_f \int_0^g \tau_b(s) ds} \quad (15.22)$$

che è valida solo se lo scorrimento dell'estremo libero è nullo.

### Bibliografia essenziale

1. Zhao X., Rahman M. M., D'Antino T., Focacci F., Carloni C. 2024. Effect of bonded length on the load response and failure mode of pull-out tests of GFRP bars embedded in concrete. Construction and Building Materials 347:128425. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128425.

2. Focacci F., Nanni A., Bakis C. E. 2000. Local Bond-Slip Relationship for FRP Reinforcement in Concrete. *Journal of Composites for Construction*, 4(1): 24-31. Doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2000)4:1(24)
3. Focacci F., Rahman M. M., D'Antino T., Carloni C. 2024. FRP Strips Externally Bonded to Quasi-Brittle Substrates: Discussions and Advances of Open Research Topics. *Journal of Composites for Construction* 28(6): 04024055. DOI: 10.1061/JCCOF2.CCENG-4603.

## 16 APPENDICE F: Metodo di verifica semplificato in condizioni di incendio

### 16.1 GENERALITA'

La procedura incrementale-iterativa tipicamente utilizzata per la costruzione di una legge momento-curvatura per analisi non lineari delle sezioni in c.a., può essere facilmente implementata in un programma di calcolo, mentre risulta meno immediata per i calcoli manuali. Inoltre, durante l'esposizione al fuoco, il carico assiale  $N_{ext}$ , può variare a causa delle azioni di vincolo. Adottando l'analisi per singoli elementi secondo EN1992-1-2, per un elemento inflesso si può assumere  $N_{ext}=0$ . Si può, quindi, utilizzare un metodo semplificato per valutare il momento flettente resistente di elementi di calcestruzzo armato con barre di FRP non protetti ed esposti al fuoco dal lato delle fibre in tensione,  $M_{Rd,fi,t}$ , conforme al metodo isoterma 500°C dell'EN1992-1-2 per elementi di calcestruzzo armati con barre in acciaio. Il campo termico è ottenuto tramite analisi termica e  $M_{Rd,fi,t}$  è valutato assumendo una 'sezione ridotta' composta da:

- calcestruzzo a temperatura inferiore a 500°C (con proprietà meccaniche uguali a quelle a 20°C)
- barre FRP con proprietà meccaniche ridotte in funzione della temperatura, secondo quanto indicato al punto (1) del §6.2.

Si noti che la legge costitutiva del calcestruzzo, suggerita da EN1992-1-2 e applicabile anche a 20°C in condizioni di incendio, differisce dalla legge usuale a temperatura normale poiché ha un marcato ramo di indebolimento.

Per le barre di FRP, invece, si può assumere un comportamento elastico-fragile.

### 16.2 ANALISI TERMICA

Il campo termico del generico elemento strutturale può essere valutato con le usuali analisi termiche per esposizione alla curva di incendio di progetto. Ispirandosi a metodi proposti in letteratura ed in normative internazionali, è possibile ricorrere a metodi semplificati che consentono di valutare con buona approssimazione la temperatura delle barre di FRP in elementi di calcestruzzo esposti al fuoco dal basso, facendo riferimento alla curva di incendio standard temperatura-tempo ISO834 (EN 1363-1, 2001) e alle proprietà termiche del calcestruzzo suggerite dagli Eurocodici.

Ad esempio, la temperatura della barra di FRP,  $T(t,c)$ , può essere valutata come:

$$\begin{aligned}
 t \leq 30 \text{ min} : \quad T(t,c) &= A_1(c) \cdot t + 20 && [^{\circ}\text{C}] \\
 t \geq 30 \text{ min} : \quad T(t,c) &= A_2(c) + A_3(c) \cdot t^{A_4(c)} && [^{\circ}\text{C}]
 \end{aligned}
 \tag{16.1}$$

dove  $t$  è il tempo di esposizione al fuoco,  $c$  è il copriferro, e i coefficienti  $A_i(c)$  sono riportati nella Tabella 16-1.

**Tabella 16-1 - Coefficienti  $A_i(c)$**

$c$ [mm]	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
<b>20</b>	11.538	-4586.1	4221.2	0.0470
<b>30</b>	8.032	-2326.8	1935.7	0.0854
<b>40</b>	5.685	-892.3	592.2	0.1774
<b>50</b>	3.997	-509.4	271.7	0.2561
<b>60</b>	2.792	-312.0	130.8	0.3400

### 16.3 ANALISI MECCANICA

Dopo aver valutato la temperatura della sezione e ridotto le proprietà meccaniche dei materiali in funzione delle alte temperature, il momento flettente resistente,  $M_{Rd,fi,t}$ , può essere calcolato secondo le stesse ipotesi assunte in condizioni normali (si veda §6.1).

Le modalità di crisi della sezione sono le stesse viste in condizioni ordinarie:

- raggiungimento della deformazione massima a trazione nelle barre di FRP,  $\varepsilon_{tot,f}$ , e deformazione nel calcestruzzo inferiore al limite  $\varepsilon_{cu}^*$ , (Campo di rottura 1);
- raggiungimento della deformazione massima a compressione nel calcestruzzo,  $\varepsilon_{cu}^*$  e deformazione nelle barre di FRP minore di quella limite,  $\varepsilon_{tot,f}$ , (Campo di rottura 2)

La deformazione  $\varepsilon_{tot,f}$  può essere calcolata come:

$$\varepsilon_{tot,f} = \varepsilon_{fu,T} + \varepsilon_{T,f} \quad (16.2)$$

dove  $\varepsilon_{fu,T}$  e  $\varepsilon_{T,f}$  sono rispettivamente la deformazione ultima e la deformazione termica, calcolate in base alla temperatura delle barre. La deformazione ultima delle barre  $\varepsilon_{fu,T}$  deve essere fornita secondo quanto indicato al punto (1) del §6.2.

Poiché la legge costitutiva del calcestruzzo sotto incendio ha un ramo di degrado (Figura 17-1), è necessario limitare la deformazione massima del calcestruzzo,  $\varepsilon_{cu}^*$ , a un valore nominale di deformazione.



Figura 16-1 - Legge costitutiva del calcestruzzo a 20°C in condizioni di incendio (EN1992-1-2)

Nel Campo 1, in ipotesi di conservazione della sezione piana, la deformazione massima a compressione nel calcestruzzo può essere calcolata come:

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fu,T} + \varepsilon_{T,f}) \cdot \frac{x}{d-x} \leq \varepsilon_{cu}^* \quad (16.3)$$

dove  $x$  è la profondità dell'asse neutro e  $d$  la distanza tra la fibra di compressione più esterna e il baricentro dell'armatura in trazione.

Nel Campo di rottura 2, la deformazione massima nel calcestruzzo compresso è pari a quella limite, mentre la deformazione nelle barre di FRP può essere espressa in funzione di quella del calcestruzzo come:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}^* \quad (16.4)$$

$$\varepsilon_{tot,f} = \varepsilon_{cu}^* \cdot \frac{d-x}{x} \leq (\varepsilon_{fu,T} + \varepsilon_{T,f}) \quad (16.5)$$

Per entrambe le modalità di rottura, l'asse neutro,  $x$ , può essere calcolato con l'equazione di equilibrio alla traslazione longitudinale:

$$N_c - N_f = 0 \quad (16.6)$$

dove  $N_c$  e  $N_f$  sono le risultanti di compressione e trazione, rispettivamente.

Infine, il momento flettente resistente  $M_{Rd,fi,t}$ , può essere calcolato tramite l'equilibrio rotazionale utilizzando le espressioni analitiche dei coefficienti adimensionali  $\psi$  e  $\lambda$  per la legge costitutiva del calcestruzzo a 20°C in condizioni di incendio (Figura 16-1) e tenendo conto che in condizioni di incendio i coefficienti di sicurezza dei materiali sono unitari e quindi  $f_{cd} = f_{ck}$ .

Per il Campo 1 (rottura delle barre di FRP), l'equilibrio alla traslazione longitudinale può essere scritto come:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} - \rho_f(T) \cdot f_{fd} \cdot A_f = 0 \quad (16.9)$$

mentre l'equilibrio alla rotazione intorno al punto di applicazione della risultante della compressione può essere scritto come:

$$M_{Rd,fi,t} = \rho_f(T) \cdot f_{fd} \cdot A_f \cdot (d - \lambda x) = 0 \quad (16.10)$$

dove  $\rho_f(T)$  è il fattore di riduzione della resistenza alla temperatura  $T$  raggiunta dalla barra al tempo  $t$ , fornito dal Fabbrikante secondo quanto indicato al punto (1) del par. 6.2, per tener conto della riduzione di resistenza rispetto alla resistenza a trazione in condizioni ordinarie,  $f_{fd}$ .

Per il Campo 2 (rottura del calcestruzzo) l'equilibrio alla traslazione può essere scritto come:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} - \rho_E(T) \cdot E_f \cdot A_f \cdot \left( \varepsilon_{cu}^* \frac{d-x}{x} - \varepsilon_{T,f} \right) = 0 \quad (16.11)$$

mentre l'equilibrio alla rotazione può essere scritto come:

$$M_{Rd,fi,t} = \rho_E(T) \cdot E_f \cdot A_f \cdot \left( \varepsilon_{cu}^* \frac{d-x}{x} - \varepsilon_{T,f} \right) \cdot (d - \lambda \cdot x) = 0 \quad (16.12)$$

dove  $\rho_E(T)$  è il fattore di riduzione del modulo elastico alla temperatura  $T$  raggiunta dalla barra al tempo  $t$ , fornito dal Fabbrikante secondo quanto indicato al punto (1) del §6.2, per tener conto della riduzione di rigidità delle barre di FRP alle alte temperature e gli altri simboli hanno il significato già introdotto in precedenza.

In generale, i coefficienti adimensionali  $\psi$  e  $\lambda$  dipendono dal valore di  $\varepsilon_{cu}^*$ , ma estese analisi parametriche (Nigro et al., 2014), basate sulla procedura incrementale-iterativa sopra ricordata, hanno mostrato che per stimare la resistenza al momento flettente di qualsiasi sezione trasversale si può adottare il valore di  $\varepsilon_{cu}^* = 0.010$  cui corrispondono i valori di  $\psi = 0.75$  e  $\lambda = 0.50$ .

Per ottenere la massima resistenza flessionale dell'elemento armato con barre di FRP, è necessario un adeguato ancoraggio delle barre. In condizioni di incendio, la lunghezza di ancoraggio delle barre FRP al tempo  $t$ ,  $\ell_{bd,fi,t}$  o la resistenza ultima dell'ancoraggio terminale al tempo  $t$ ,  $\sigma_{fd,fi,t}$ , possono essere determinate utilizzando le (5.2) o le (5.5), rispettivamente, per le condizioni di temperatura ordinaria, assumendo che l'adesione tra la barra FRP e il calcestruzzo sia trascurabile per temperature delle barre superiori a un valore limite convenzionale. Sulla base dello studio di Katz et al. (2000), questo valore limite convenzionale di temperatura può essere assunto in modo conservativo pari a 50°C; per tutte le barre testate da (Katz et al., 2000), per temperature delle barre inferiori a 50°C, la riduzione della resistenza di adesione è, infatti, risultata inferiore al 10%.

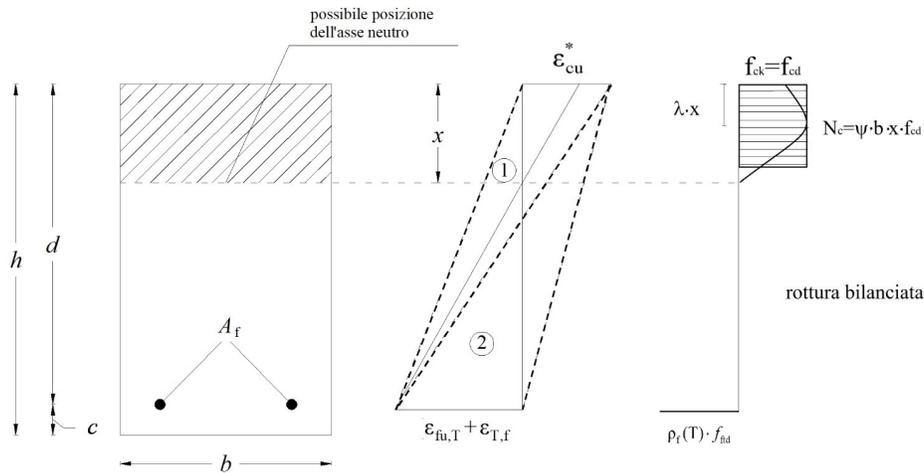


Figura 16-2 - Deformazioni e sollecitazioni allo stato limite ultimo (ULS)

Nelle zone dove la barra ha una temperatura superiore a 50°C, la lunghezza di aderenza in zona protetta,  $\ell_{bd,fi,t,T>50^\circ C}$ , che va aggiunta a quella data dalle (5.2), (si veda Figura 16-3), può essere determinata come segue:

$$\ell_{bd,fi,t,T>50^\circ C} = B_1(c) + B_2(c) \cdot t^{-B_3(c)} \quad [^\circ C] \quad (16.15)$$

dove  $t$  è il tempo di esposizione al fuoco,  $c$  è il copriferro in calcestruzzo, e i coefficienti  $B_i(c)$  sono riportati nella Tabella 16-3. La (16.15) è stata ottenuta interpolando i risultati delle analisi termiche riportate in (Nigro et al., 2012a).

La somma della lunghezza di ancoraggio efficace  $\ell_{bd,fi,t}$  e della lunghezza non efficace,  $\ell_{bd,fi,t,T>50^\circ C}$ , fornisce la lunghezza totale  $\ell_{bd,tot}$  della zona che non deve essere esposta direttamente all'azione incendio per garantire il corretto ancoraggio delle barre.

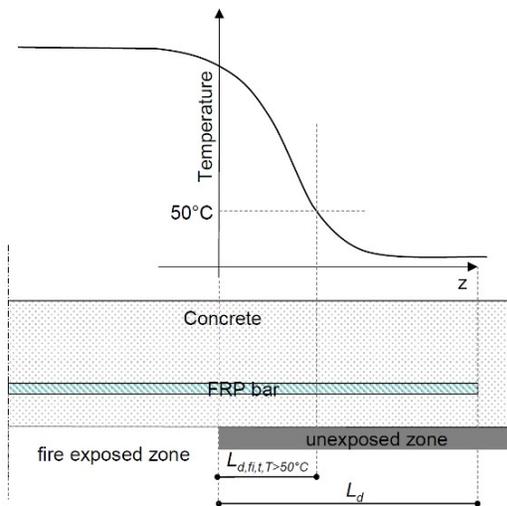


Figura 16-3 – Lunghezza di ancoraggio

Tabella 16-3 - Coefficienti  $B_i(c)$

$c$ [mm]	$B_1$	$B_2$	$B_3$
20	-23.43	15.38	0.4660
30	-104.68	58.45	0.2821
40	-159.79	87.28	0.2437
50	-2159.93	1995.44	0.0280
60	-13582.44	13347.56	0.0055



Figura 16-4 – Soletta esposta all'azione del fuoco – ancoraggio dell'armatura nella trave in calcestruzzo

### Bibliografia essenziale

1. E. Nigro, G. Cefarelli, A. Bilotta, G. Manfredi, E. Cosenza (2011). Fire resistance of concrete slabs reinforced with FRP bars. Part I: experimental investigations on the mechanical behavior. *Composites: Part B, Engineering*, vol. 42, p. 1739-1750, ISSN: 1359-8368
2. E. Nigro, G. Cefarelli, A. Bilotta, G. Manfredi, E. Cosenza (2011). Fire resistance of concrete slabs reinforced with FRP bars. Part II: experimental results and numerical simulations on the thermal field, *Composites: Part B, Engineering*, vol. 42, p. 1751-1763, ISSN: 1359-8368.
3. Nigro E., Cefarelli G., Bilotta A., Manfredi G., Cosenza E. (2012). Performance under fire situations of concrete members reinforced with FRP rods: bond models and design nomograms. *J. of Composites for Construction*, vol. 16, p. 395-406, ISSN: 1090-0268.
4. Nigro E, Cefarelli G, Bilotta A, Manfredi G, Cosenza E (2014). Guidelines for flexural resistance of FRP reinforced concrete slabs and beams in fire, *Composites: Part B, Engineering*, ISSN: 1359-8368, pp. 103-112.
5. Bilotta, A., Compagnone, A., Esposito, L., Nigro, E. (2020). Structural behaviour of FRP reinforced concrete slabs in fire, *Engineering Structures*, 221, ISSN 0141-0296.

## 17 APPENDICE G: Esempi di calcolo

### 17.1 PROGETTO A FLESSIONE DI TRAVI IN C.A. CON BARRE DI FRP

Si riporta di seguito un esempio di verifica a flessione, agli SLU e SLE, di una trave appoggiata in calcestruzzo armato con barre di GFRP. Le varie verifiche sono condotte considerando il numero di barre minimo per il soddisfacimento delle rispettive verifiche, al fine di poter compiere valutazioni su quali siano le verifiche più restrittive.

Si considera la sezione rettangolare caratterizzata dalla seguente geometria:

- base  $b = 300$  mm,
- altezza totale  $h = 600$  mm,
- copriferro (meccanico)  $c = 40$  mm,
- altezza utile  $d = 560$  mm

Si considera una trave con luce  $L = 5$  m con schema statico di doppio appoggio.

Si assume un calcestruzzo di classe C30/37, con resistenza cilindrica caratteristica  $f_{ck} = 30$  MPa e resistenza media  $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 38$  MPa.

La resistenza media a trazione del calcestruzzo,  $f_{ctm}$ , è pari a:

$$f_{ctm} = 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 2.9 \text{ MPa}$$

Il modulo elastico medio secante del calcestruzzo,  $E_c$ , è pari a:

$$E_c = 22000 \cdot \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{2/3} = 32837 \text{ MPa}$$

Si assume che la trave sia soggetta ai seguenti carichi distribuiti per unità di lunghezza:

- Carichi permanenti strutturali e non strutturali (valori nominali):  $g_1 + g_2 = 13.0$  kN/m
- Carichi variabili (valore caratteristico):  $q_k = 14.5$  kN/m

Si ipotizza di utilizzare barre in vetro (GFRP) di classe E45/800, caratterizzate quindi da una resistenza a trazione caratteristica  $f_{fk0} = 850$  MPa e da un valore medio del modulo elastico  $E_f = 45$  GPa, con diametro nominale  $d_b = 14$  mm.

Si ipotizza una condizione di esposizione esterna non aggressiva (corrispondente ad una delle classi di esposizione XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3).

### 17.2 VERIFICHE ALLO SLU

Per la combinazione di carico allo SLU, la tensione nelle barre di FRP deve essere inferiore al valore:

$$f_{nd} = \eta_T \cdot \eta_a \cdot \eta_{c,f} \frac{f_{fk0}}{\gamma_f}$$

con  $f_{fk0} = 850$  MPa,  $\eta_a = 0.8$  e  $\eta_T = 0.9$  per esposizione in ambiente esterno non aggressivo,  $\gamma_f = 1.25$ .

Il coefficiente riduttivo per tener conto degli effetti di viscosità nelle barre indotti da uno stato tensionale persistente si calcola come:

$$\eta_{c,l} = 1 - (1 - \eta_c) \cdot \frac{\sigma_{f,qp}}{f_{ftk,c}}$$

in cui si assume per barre di vetro  $\eta_c = 0.40$  e, quindi,  $f_{ftk,c} = \eta_c \cdot f_{ftk0} = 0.40 \cdot 850 = 340$  MPa.

$\sigma_{f,qp}$  è la tensione agente nella barra di FRP per effetto del carico persistente da calcolarsi con riferimento alla combinazione di carico quasi-permanente. Il carico distribuito di progetto agente sulla trave in combinazione quasi permanente è pari a:

$$q_{d,qp} = g_1 + g_2 + 0.3q_k = 17.35 \text{ kN/m.}$$

Il momento massimo corrispondente a tale carico è  $M_{\max,qp} = \frac{q_{d,qp} \cdot L^2}{8} = \frac{17.35 \cdot 5^2}{8} = 54.22$  kN m che risulta maggiore del momento di prima fessurazione della sezione, calcolabile in maniera semplificata, trascurando il contributo delle barre di FRP, come  $M_{fex} = \frac{B \cdot H^2}{6} f_{ctm} = 52.14$  kN m.

Ipotizzando 5 barre con  $d_b = 14$  mm ( $A_f = 769$  mm<sup>2</sup>), la tensione  $\sigma_{f,qp}$  si può, quindi, calcolare in maniera semplificata come:

$$\sigma_f = \frac{M_{\max,qp}}{0.9A_f \cdot d} = \frac{54.22 \cdot 10^6}{0.9 \cdot 769 \cdot 560} = 140 \text{ MPa.}$$

Pertanto, risulta  $\eta_{c,l} = 1 - (1 - 0.45) \cdot \frac{140}{0.45 \cdot 850} = 0.75$ .

La tensione di progetto nelle barre di FRP risulta, quindi:

$$f_{ftd} = 0.80 \cdot 0.9 \cdot 0.75 \cdot \frac{850}{1.25} = 369 \text{ MPa.}$$

Il carico distribuito di progetto agente sulla trave in combinazione SLU è pari a:

$$q_{d,qp} = 1.3g_1 + 1.5g_2 + 1.5q_k = 39.6 \text{ kN/m}$$

cui corrisponde un momento massimo sollecitante  $M_{sd} = 123.6$  kN m.

La resistenza di progetto del calcestruzzo è pari a  $f_{cd} = 0.85 \cdot \frac{30}{1.5} = 17.0$  MPa, essendo  $f_{ck} = 30$  MPa.

Ipotizzando la crisi per trazione delle barre di FRP, dall'equilibrio alla traslazione, si ha:

$$\psi f_{cd} \cdot b \cdot x = A_f \cdot f_{ftd} \rightarrow x = \frac{A_f \cdot f_{ftd}}{\psi f_{cd} \cdot b} = 94 \text{ mm}$$

avendo trovato per via iterativa  $\psi = 0.60$  sulla base delle seguenti relazioni ( $\epsilon_c$  espressa in ‰):

$$\psi = \begin{cases} \epsilon_c \left( 0.5 - \frac{\epsilon_c}{12} \right) & \text{per } \epsilon_c \leq 2.00\text{‰} \\ 1 - \frac{2}{3\epsilon_c} & \text{per } 2.00\text{‰} \leq \epsilon_c \leq 3.50\text{‰} \end{cases}$$

ed essendo:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{fid} \cdot \frac{x}{(d-x)} = \frac{369}{45000} \cdot \frac{94}{(560-94)} = 0.0016 < 0.0020, \text{ che giustifica il calcolo esatto dei coeffi-}$$

cienti  $\psi$  e  $\lambda$ .

Dall'equilibrio alla rotazione si ottiene il seguente momento resistente:

$$M_{Rd} = \psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (0.5h - \lambda \cdot x) + A_f \cdot f_{fid} \cdot (0.5h - c) = 148.4 \text{ kN m} > M_{sd} = 123.6 \text{ kN m}$$

In cui  $\lambda = 0.364$  è stato calcolato sulla base delle seguenti relazioni ( $\varepsilon_c$  espressa in ‰):

$$\lambda = \begin{cases} \frac{8 - \varepsilon_c}{4(6 - \varepsilon_c)} & \text{per } \varepsilon_c \leq 2.00\% \\ \frac{\varepsilon_c(3\varepsilon_c - 4) + 2}{2\varepsilon_c(3\varepsilon_c - 2)} & \text{per } 2.00\% \leq \varepsilon_c \leq 3.50\% \end{cases}$$

Il valore dell'asse neutro e della deformazione al lembo compresso di calcestruzzo confermano che la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione ultima nell'armatura di FRP (campo di rottura 1).

#### Calcolo della lunghezza di ancoraggio

Si procede al calcolo della lunghezza di ancoraggio, assumendo  $\sigma_{fid} = f_{fid} = 369 \text{ MPa}$ .

In caso di barre con classe di aderenza 1, assumendo  $k_{cp} = 1$  e trascurando il termine  $\left(\frac{1.5d_b}{c_d}\right)^{1/2}$  in quanto minore dell'unità, si ha:

$$\ell_a = k_{cp} \cdot k_\ell \cdot d_b \cdot \left(\frac{\sigma_{fid}}{500}\right)^2 \cdot \left(\frac{25}{f_{ck}}\right)^{4/5} \cdot \left(\frac{d_b}{20}\right)^{2/5} \cdot \left(\frac{1.5d_b}{c_d}\right)^{1/2} \text{ con } k_\ell = 30$$

$$\ell_a = 30 \cdot 14 \cdot \left(\frac{369}{500}\right)^2 \cdot \left(\frac{25}{30}\right)^{4/5} \cdot \left(\frac{14}{20}\right)^{2/5} = 171 \text{ mm } (\approx 12 d_b)$$

In caso di barre con classe di aderenza 2, assumendo  $k_{cp} = 1$  e trascurando il termine  $\left(\frac{1.5d_b}{c_d}\right)^{1/2}$  in quanto minore dell'unità, si ha:

$$\ell_a = k_{cp} \cdot k_\ell \cdot d_b \cdot \left(\frac{\sigma_{fid}}{500}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{25}{f_{ck}}\right)^{3/5} \cdot \left(\frac{d_b}{20}\right)^{3/10} \cdot \left(\frac{1.5d_b}{c_d}\right)^{1/2} \text{ con } k_\ell = 65$$

$$\ell_a = 62 \cdot 14 \cdot \left(\frac{369}{500}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{25}{30}\right)^{3/5} \cdot \left(\frac{14}{20}\right)^{3/10} = 465 \text{ mm } = (\approx 33 d_b)$$

Per barre di FRP di classe di aderenza 1, il valore calcolato della lunghezza di ancoraggio (171 mm) è inferiore al limite minimo di 300 mm e di  $20 d_b = 280 \text{ mm}$  e, pertanto, si adotta una lunghezza di ancoraggio di progetto  $\ell_{ad} = 300 \text{ mm}$ .

Per barre di FRP di classe di aderenza 2, il valore calcolato della lunghezza di ancoraggio (465 mm) è superiore al limite minimo di 300 mm e di 20  $d_b = 280$  mm e, pertanto, si adotta una lunghezza di ancoraggio di progetto  $\ell_{ad} = 465$  mm.

## 17.3 VERIFICHE ALLO SLE

### 17.3.1 Verifiche tensionali

Per la combinazione di carico quasi permanente, la tensione nelle barre di FRP deve soddisfare la seguente limitazione:

$$\sigma_f \leq \eta_T \cdot \eta_a \cdot \eta_c \cdot \frac{f_{ftk0}}{\gamma_f} = 245 \text{ MPa}$$

essendo  $f_{ftk0} = 850$  MPa,  $\eta_T = 0.90$  per elementi esposti all'esterno,  $\eta_a = 0.80$  in ipotesi di condizione di esposizione non aggressiva,  $\eta_c = 0.40$ ,  $\gamma_f = 1.0$ .

Il carico distribuito di progetto agente sulla trave in combinazione quasi permanente è pari a:

$$q_{d,qp} = g_1 + g_2 + 0.3q_k = 17.35 \text{ kN/m}$$

Il momento massimo corrispondente a tale carico è  $M_{\max,qp} = \frac{q_{d,qp} \cdot L^2}{8} = \frac{17.35 \cdot 5^2}{8} = 54.22$  kN m che

risulta maggiore del momento di prima fessurazione della sezione, calcolabile in maniera semplificata, trascurando il contributo delle barre di FRP, come  $M_{fex} = \frac{B \cdot H^2}{6} f_{ctm} = 52.14$  kN m. La sezione

di momento massimo risulta, quindi, fessurata.

Per tener conto dei fenomeni di viscosità nel calcestruzzo compresso, si utilizza il modulo elastico

efficace  $E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \varphi(t, t_0)} = \frac{32837}{1 + 2} = 10946$  MPa avendo assunto il coefficiente di viscosità

$$\varphi(t, t_0) = 2.$$

Si considerano le 5 barre con  $d_b = 14$  mm ( $A_f = 769.30$  mm<sup>2</sup>) definite sulla base della verifica allo SLU e la tensione nelle barre di FRP si calcola come segue, in ipotesi di materiali a comportamento elastico lineare:

$$\sigma_f = \alpha_f \cdot \frac{M_{\max,qp}}{I_2} \cdot (d - x_2)$$

In cui:

$$\alpha_f = \frac{E_f}{E_{c,eff}} = \frac{45000}{10946} = 4.1 \text{ è il coefficiente di omogeneizzazione,}$$

- $x_2$  e  $I_2$  sono l'asse neutro e l'inerzia rispetto ad esso della sezione fessurata in cui le sole barre di FRP in trazione sono portate in conto ed omogeneizzate attraverso il coefficiente  $\alpha_f$ . L'asse neutro si calcola attraverso l'annullamento del momento statico della sezione fessurata omogeneizzata al calcestruzzo:

$$S_n = 0 \rightarrow \frac{b \cdot x_2^2}{2} - \alpha_f \cdot A_f \cdot (d - x_2) = 0 \rightarrow x = 98.6 \text{ mm}$$

L'inerzia della sezione si calcola, quindi, come:

$$I_2 = \frac{b \cdot x_2^3}{3} + \alpha_f \cdot A_f \cdot (d - x_2)^2 = 769.2 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

La tensione nelle barre di FRP è, quindi, pari a:

$$\sigma_f = \alpha_f \cdot \frac{M_{\max,qp}}{I_2} \cdot (d - x_2) = 4.1 \cdot \frac{54.22 \cdot 10^6}{769.2 \cdot 10^6} \cdot (560 - 98.6) = 134 \text{ MPa} < 245 \text{ MPa}.$$

Le tensioni nel calcestruzzo vanno inoltre limitate come segue in accordo con quanto prescritto nella Normativa vigente:

$$\sigma_c = \frac{M_{\max,qp}}{I_2} \cdot x_2 = \frac{54.22 \cdot 10^6}{769.2 \cdot 10^6} \cdot 98.6 = 7.0 \text{ MPa} < 0.45 f_{ck} = 13.5 \text{ MPa}.$$

Le verifiche sono ampiamente soddisfatte e si osserva che il numero minimo di barre necessarie per soddisfare le verifiche tensionali in entrambi i materiali è pari a 3; infatti, utilizzando 3 barre con  $d_b = 14 \text{ mm}$  ( $A_f = 153.9 \text{ mm}^2$ ), si ottiene  $\sigma_f = 220 \text{ MPa} < 245 \text{ MPa}$  e  $\sigma_c = 8.7 \text{ MPa} < 13.5 \text{ MPa}$ .

Per la combinazione di carico caratteristica (rara), la tensione nelle barre di FRP deve soddisfare la seguente limitazione:

$$\sigma_f \leq \eta_T \cdot \eta_a \cdot 0.8 \cdot \frac{f_{fk0}}{\gamma_f} = 490 \text{ MPa}$$

essendo  $f_{fk} = 850 \text{ MPa}$ ,  $\eta_a = 0.80$ ,  $\eta_T = 0.9$ ,  $\gamma_f = 1.0$ .

Il carico distribuito di progetto agente sulla trave in combinazione rara è pari a:

$$q_{d,rara} = g_1 + g_2 + q_k = 27.5 \text{ kN/m}$$

ed il momento massimo corrispondente è:

$$M_{\max,rara} = \frac{q_{d,rara} \cdot L^2}{8} = \frac{27.5 \cdot 5^2}{8} = 85.94 \text{ kN m}.$$

In combinazione rara, si utilizza il modulo elastico del calcestruzzo non affetto da fenomeni viscosi,  $E_c = 32837$  MPa, per cui il coefficiente di omogeneizzazione per le barre di FRP è

$$\alpha_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{45000}{32837} = 1.37.$$

Considerando le 5 barre con  $d_b = 14$  mm ( $A_f = 769.30$  mm<sup>2</sup>) definite in base alla verifica allo SLU ed, adottando  $\alpha_f = 1.37$ , si ottiene:

- $x_2 = 59.3$  mm,  $I_2 = 285.2 \cdot 10^6$  mm<sup>4</sup>,
- $\sigma_f = \alpha_f \cdot \frac{M_{\max, \text{rara}}}{I_2} \cdot (d - x_2) = 1.37 \cdot \frac{85.94 \cdot 10^6}{285.2 \cdot 10^6} \cdot (560 - 59.3) = 206.8$  MPa < 490.0 MPa.
- $\sigma_c = \frac{M_{\max, \text{rara}}}{I_2} \cdot x_2 = \frac{85.94 \cdot 10^6}{285.2 \cdot 10^6} \cdot 59.3 = 17.9$  MPa <  $0.60 f_{ck} = 18.0$  MPa

Si osserva che, per la verifica delle tensioni in combinazione rara, la limitazione sulla massima tensione di compressione nel calcestruzzo è condizionante nella definizione del numero di barre di FRP necessarie. Per soddisfare la limitazione tensionale nelle barre di FRP, sono sufficienti, infatti, solo 3 barre con  $d_b = 14$  mm.

### 17.3.2 Controllo dell'ampiezza delle fessure

Per la combinazione di carico quasi permanente in condizioni di esposizione esterne, l'apertura massima delle fessure deve rispettare la seguente limitazione:

$$w_k = k_{1/r} \cdot s_{r, \max} \cdot (\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm}) \leq 0.5 \text{ mm}$$

Si assume lo stesso coefficiente di omogeneizzazione adottando in precedenza per le verifiche ten-

sionali in combinazione di carico quasi permanente,  $\alpha_f = \frac{E_f}{E_{c, \text{eff}}} = \frac{45000}{10946} = 4.1$ , ottenuto assumendo

$$\varphi(t, t_0) = 2.$$

Si ipotizzano le 5 barre con  $d_b = 14$  mm ( $A_f = 769.3$  mm<sup>2</sup>), definite dalla verifica della sezione allo SLU. L'asse neutro e l'inerzia della sezione fessurata omogeneizzata si calcolano con le formule viste in precedenza:

$$x_2 = 99 \text{ mm}, I_2 = 769.2 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\text{Si ottiene, quindi, } k_{1/r} = \frac{h - x_2}{d - x_2} = \frac{600 - 99}{560 - 99} = 1.09.$$

Si procede al calcolo della distanza massima tra le fessure,  $s_{r, \max}$ :

$$s_{r,\max} = \beta_w \cdot \left( k_c \cdot c_{\text{geom}} + k_{\phi/r} \cdot k_{\eta} \cdot k_b \frac{f_{\text{ctm}} \cdot d_b}{\tau_{\text{bfm}} \cdot \rho_f} \right)$$

essendo:

- $\beta_w = 1.7$ ;
- $k_c = 1.5$ ;
- $c_{\text{geom}} = c - 0.5d_b = 40 - 7 = 33$  mm, essendo  $c_{\text{geom}}$  la distanza, valutata al netto del diametro, delle barre di FRP dal bordo inferiore della sezione in calcestruzzo;
- $k_{\phi/r} = 0.25$ ;
- $k_{\eta} = \frac{h - h_{\text{c,ef}}}{h}$ , essendo  $h_{\text{c,ef}}$  l'altezza dell'area di calcestruzzo efficace in trazione definita come segue:

$$h_{\text{c,ef}} = \min \{ c + 5d_b; 10d_b; 3.5c; h - x_2; h/2 \} = \min \{ 40 + 5 \cdot 14; 140; 3.5 \cdot 40; 600 - 99; 300 \} = 110 \text{ mm}$$

da cui si ottiene  $k_{\eta} = \frac{h - h_{\text{c,ef}}}{h} = \frac{600 - 110}{600} = 0.82$ .

- $k_b = 0.9$  in caso di barre posizionate in basso durante il getto.
- $\tau_{\text{bfm}} = 1.25 \cdot f_{\text{ctm}}$  per barre di FRP di classe di aderenza 2 o  $\tau_{\text{bfm}} = 1.50 \cdot f_{\text{ctm}}$  per barre di FRP di classe di aderenza 1.
- $\rho_f = \frac{A_f}{A_{\text{c,ef}}} = \frac{A_f}{b \cdot h_{\text{c,ef}}} = \frac{923.2}{300 \cdot 110} = 0.028$

Si ottiene, pertanto:

$$s_{r,\max} = 209 \text{ mm per barre in classe di aderenza 1}$$

$$s_{r,\max} = 234 \text{ mm per barre in classe di aderenza 2}$$

Si procede, quindi, al calcolo della differenza di deformazioni nel calcestruzzo teso e nell'armatura di FRP tra due fessure come segue:

$$\varepsilon_{\text{fm}} - \varepsilon_{\text{cm}} = \left( \frac{\sigma_f}{E_f} - k_t \frac{f_{\text{ctm}}}{E_f \cdot \rho_f} + k_t \frac{f_{\text{ctm}}}{E_c} \right) \geq \frac{\sigma_f}{E_f} (1 - k_t)$$

La tensione nelle barre di FRP corrispondente alla combinazione di carico quasi permanente si calcola come segue:

$$\sigma_f = \alpha_f \cdot \frac{M_{\text{max,qp}}}{I_2} \cdot (d - x_2) = 4.11 \cdot \frac{54.20 \cdot 10^6}{769.2 \cdot 10^6} \cdot (560 - 99) = 133.7 \text{ MPa}$$

avendo già calcolato in precedenza il momento  $M_{\text{max,qp}} = 54.20 \text{ kN m}$ .

Si assume, inoltre:

- $k_t = 0.4$  per carichi di lunga durata o per carichi ripetuti;
- $f_{ctm} = 2.9$  MPa
- $E_c = 32837$  MPa
- $E_f = 45000$  MPa

Ottenendo, quindi:

$$\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm} = 0.00183 \geq 0.6 \frac{\sigma_f}{E_f} = 0.00178$$

L'ampiezza massima delle fessure risulta:

- per barre in classe di aderenza 1:  $w_k = 1.09 \cdot 209 \cdot 0.00183 = 0.42 \text{ mm} < 0.50 \text{ mm}$
- per barre in classe di aderenza 2:  $w_k = 1.09 \cdot 234 \cdot 0.00183 = 0.47 \text{ mm} < 0.50 \text{ mm}$

La verifica risulta quindi soddisfatta con 5 barre con  $d_b = 14$  mm per entrambe le classi di aderenza.

Per la combinazione di carico frequente, l'apertura massima delle fessure deve rispettare la seguente limitazione:

$$w_k = k_{1/r} \cdot s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm}) \leq 0.6 \text{ mm}$$

Si assume per questa combinazione di carico  $\varphi(t, t_0) = 1$ , che corrisponde ad una verifica delle tensioni in una condizione temporale intermedia tra  $t = 0$  e  $t = \infty$  (nelle usuali verifiche degli elementi di calcestruzzo armati con barre di acciaio, assumere  $\varphi(t, t_0) = 1$  corrisponde ad avere il coefficiente di omogeneizzazione barre-calcestruzzo pari a 15).

$$\text{Si calcola, quindi, } E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \varphi(t, t_0)} = \frac{32837}{2} = 16418 \text{ e } \alpha_f = \frac{E_f}{E_{c,eff}} = \frac{45000}{16418} = 2.74.$$

Si assumono 5 barre con  $d_b = 14$  mm ( $A_f = 769.3 \text{ mm}^2$ ) come definiti dalla verifica della sezione allo SLU. Utilizzando  $\alpha_f = 2.74$ , la posizione dell'asse neutro e l'inerzia della sezione fessurata omogeneizzata si calcolano con le formule viste in precedenza:

$$x = 82 \text{ mm, } I_2 = 536.9 \cdot 10^6 \text{ mm}^4.$$

$$k_{1/r} = \frac{h - x_2}{d - x_2} = \frac{600 - 82}{560 - 82} = 1.08$$

Adottando le stesse assunzioni fatte in precedenza ( $\beta_w = 1.7$ ,  $k_c = 1.5$ ,  $c_{geom} = 33$  mm,  $k_{\phi/r} = 0.25$ ;

$k_{fl} = \frac{h - h_{c,ef}}{h} = 0.82$ ,  $h_{c,ef} = 110$  mm,  $k_b = 0.9$ ,  $\rho_f = 0.023$ ), si ottengono gli stessi valori della di-

stanza massima tra le fessure:

$s_{r,max} = 209$  mm per classe di aderenza 1

$s_{r,max} = 234$  mm per classe di aderenza 2

La tensione nelle barre di FRP corrispondente alla combinazione di carico frequente si calcola come segue:

$$\sigma_f = \alpha_f \cdot \frac{M_{max,fr}}{I_2} \cdot (d - x_2) = 2.74 \cdot \frac{63.3 \cdot 10^6}{536.9 \cdot 10^6} \cdot (560 - 82) = 154.4 \text{ MPa}$$

Essendo il momento  $M_{max,fr} = \frac{q_{d,fr} \cdot L^2}{8} = \frac{20.0 \cdot 5^2}{8} = 63.3$  kN m e  $q_{d,fr} = g_1 + g_2 + 0.5q_k = 20.25$  kN/m.

Si assume, inoltre:

- $k_t = 0.4$  per carichi di lunga durata o per carichi ripetuti;
- $f_{ctm} = 2.9$  MPa
- $E_c = 32837$  MPa
- $E_f = 45000$  MPa

Ottenendo, quindi:

$$\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm} = 0.00292 \geq 0.6 \frac{\sigma_f}{E_f} = 0.00206$$

L'ampiezza massima delle fessure risulta:

- per barre in classe di aderenza 1:  $w_k = 1.08 \cdot 209 \cdot 0.00292 = 0.52$  mm < 0.6 mm
- per barre in classe di aderenza 2:  $w_k = 1.08 \cdot 234 \cdot 0.00292 = 0.58$  mm < 0.6 mm

### 17.3.3 Verifica di deformabilità

#### 18.3.1 Verifica in combinazione di carico caratteristica

Si effettua la verifica per la combinazione di carico caratteristica (rara), ipotizzando 5 barre con  $d_b = 14$  mm ( $A_f = 769.3$  mm<sup>2</sup>), come definite dalla verifica allo SLU, ed adottando la limitazione  $f/L \leq 1/250$ .

Il momento massimo corrispondente alla combinazione rara è già stato calcolato in precedenza:

$$M_{max,rara} = \frac{q_{d,rara} \cdot L^2}{8} = \frac{27.5 \cdot 5^2}{8} = 85.9 \text{ kN m.}$$

In combinazione rara, si utilizza il modulo elastico del calcestruzzo non affetto da fenomeni viscosi,  $E_c = 32837$  MPa, per cui il coefficiente di omogeneizzazione per le barre di FRP è

$$\alpha_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{45000}{32837} = 1.37. \text{ Per tale valore di } \alpha_f \text{ e per } A_f = 769.3 \text{ mm}^2, \text{ l'asse neutro e l'inerzia ri-}$$

spetto ad esso della sezione fessurata sono stati già calcolati (verifica delle tensioni in combinazione rara) e sono pari a  $x_2 = 59.3$  mm e  $I_2 = 285.2 \cdot 10^6$  mm<sup>4</sup>. Si può procedere al calcolo della freccia  $f_2$  nell'ipotesi di sezione fessurata e parzializzata:

$$f_2 = \frac{5}{384} \frac{q_{d,rara} \cdot L^4}{E_c \cdot I_2} = \frac{5}{384} \frac{27.5 \cdot 5000^4}{32837 \cdot 285.2 \cdot 10^6} = 23.90 \text{ mm}$$

Per il calcolo della freccia  $f_1$  in ipotesi di sezione interamente reagente, si calcola l'asse neutro  $x_1$  e l'inerzia della sezione  $I_1$  come segue, trascurando sempre l'eventuale armatura di FRP compressa e considerando  $\alpha_f = 1.37$  e  $A_f = 769.3$  mm<sup>2</sup>:

$$x_1 = \frac{0.5b \cdot h^2 + \alpha_f \cdot A_f \cdot d}{b \cdot h + \alpha_f \cdot A_f} = 301.5 \text{ mm}$$

$$I_1 = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot (0.5h - x_1)^2 + \alpha_f \cdot A_f \cdot (d - x_1)^2 = 5470.9 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Si può, quindi, procedere al calcolo della freccia  $f_1$ :

$$f_1 = \frac{5}{384} \frac{q_{d,rara} \cdot L^4}{E_c \cdot I_1} = \frac{5}{384} \frac{27.5 \cdot 5000^4}{32837 \cdot 5470.9 \cdot 10^6} = 1.25 \text{ mm}$$

La freccia complessiva si calcola come combinazione delle frecce  $f_1$  e  $f_2$ :

$$f = f_1 \cdot (1 - \gamma) + f_2 \cdot \gamma$$

$$\gamma = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^2$$

-  $\beta_1 = 0.85$  per barre con classe di aderenza 1 e 0.7 per barre con classe di aderenza 2.

-  $\beta_2 = 1.0$  per carichi di breve durata.

-  $M_{max}$  è il momento agente nella sezione più sollecitata dell'elemento, da valutarsi con riferimento alla combinazione di carico rara (si veda punto (6) del 7.3), per cui  $M_{max} = M_{max,rara} = 85.94$  kN m.

-  $M_{cr}$  è il momento di prima fessurazione, già calcolato in precedenza come

$$M_{fex} = \frac{B \cdot H^2}{6} f_{ctm} = 52.14 \text{ kN m (si osserva che il calcolo esatto del momento tenendo conto del con-}$$

tributo delle barre di FRP ed utilizzando i valori di  $x_1$  e  $I_1$  precedentemente calcolati, fornisce

$$M_{\text{fex}} = \frac{f_{\text{ctm}} \cdot I_1}{(h - x_1)} = 53.10 \text{ kN m, di poco differente dal valore ottenuto trascurando le armature).}$$

Si osserva, infine, che per il calcolo delle frecce in presenza di sollecitazioni prettamente flessionali, l'Eurocodice 2 suggerisce di calcolare il momento di fessurazione considerando la resistenza a trazione per flessione definita come

$$f_{\text{ctm,fl}} = \max \left\{ \left( 1.6 - \frac{h}{1000} \right) \cdot f_{\text{ctm}}; f_{\text{ctm}} \right\}, \text{ che nel caso in esame}$$

coincide con  $f_{\text{ctm}} = 2.9 \text{ MPa}$ .

Si ottiene pertanto:

- per barre di classe di aderenza 2:

$$\gamma = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left( \frac{M_{\text{cr}}}{M_{\text{max}}} \right)^2 = 1 - 1.0 \cdot 0.7 \cdot \left( \frac{52.14}{85.94} \right)^2 = 0.74$$

$$f = f_1 \cdot (1 - \gamma) + f_2 \cdot \gamma = 1.25 \cdot 0.26 + 23.9 \cdot 0.74 = 18.1 \text{ mm} \rightarrow \frac{f}{L} = \frac{18.1}{5000} = 0.0036 < \frac{1}{250} = 0.004$$

- per barre di classe di aderenza 1:

$$\gamma = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left( \frac{M_{\text{cr}}}{M_{\text{max}}} \right)^2 = 1 - 1.0 \cdot 0.85 \cdot \left( \frac{52.14}{85.94} \right)^2 = 0.69$$

$$f = f_1 \cdot (1 - \gamma) + f_2 \cdot \gamma = 1.25 \cdot 0.31 + 23.9 \cdot 0.69 = 16.8 \text{ mm} \rightarrow \frac{f}{L} = \frac{16.8}{5000} = 0.0034 < \frac{1}{250} = 0.004$$

### 18.3.2 Verifica in combinazione di carico quasi permanente

La verifica di deformabilità condotta per la combinazione di carico quasi permanente condotta ipotizzando 5 barre con  $d_b = 14 \text{ mm}$  ( $A_f = 769.3 \text{ mm}^2$ ), come definite dalla verifica allo SLU, risulta ampiamente soddisfatta con riferimento alla limitazione  $f/L \leq 1/250$ .

Si riportano, pertanto, a seguire anche i calcoli relativi alla verifica di deformabilità per la combinazione di carico quasi permanente ipotizzando un numero minore di barre: 4 barre con  $d_b = 14 \text{ mm}$  ( $A_f = 615.4 \text{ mm}^2$ ). Il momento massimo corrispondente a tale combinazione è già stato calcolato in

$$\text{precedenza, } M_{\text{max,qp}} = \frac{q_{\text{d,qp}} \cdot L^2}{8} = \frac{17.35 \cdot 5^2}{8} = 54.2 \text{ kN m.}$$

In combinazione quasi permanente, si utilizza il modulo elastico del calcestruzzo efficace,

$$E_{\text{c,eff}} = \frac{E_c}{1 + \varphi(t, t_0)} = \frac{32837}{3} = 10946 \text{ MPa avendo assunto il coefficiente di viscosità } \varphi(t, t_0) = 2. \text{ Si}$$

utilizza, quindi,  $\alpha_f = \frac{E_f}{E_{c,eff}} = \frac{45000}{10946} = 4.11$  e per  $A_f = 615.4 \text{ mm}^2$ ; per tali dati i valori di asse neu-

tro ed inerzia della sezione fessurata omogeneizzata sono stati già calcolati in precedenza (verifiche tensionali in combinazione quasi-permanente) e risultano:  $x_2 = 89.1 \text{ mm}$  e  $I_2 = 631.8 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$ .

Si può procedere al calcolo della freccia  $f_2$  nell'ipotesi di sezione fessurata e parzializzata:

$$f_2 = \frac{5}{384} \frac{q_{d,qp} \cdot L^4}{E_c \cdot I_2} = \frac{5}{384} \cdot \frac{17.35 \cdot 5000^4}{10946 \cdot 631.8 \cdot 10^6} = 20.4 \text{ mm}$$

Per il calcolo della freccia  $f_1$  in ipotesi di sezione interamente reagente, si calcola l'asse neutro  $x_1$  e l'inerzia della sezione  $I_1$  come segue, trascurando sempre l'eventuale armatura di FRP compressa e considerando  $\alpha_f = 4.11$  e  $A_f = 615.4 \text{ mm}^2$ :

$$x_1 = \frac{0.5b \cdot h^2 + \alpha_f \cdot A_f \cdot d}{b \cdot h + \alpha_f \cdot A_f} = 303.6 \text{ mm}$$

$$I_1 = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot (0.5h - x_1)^2 + \alpha_f \cdot A_f \cdot (d - x_1)^2 = 5568.7 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Si può, quindi, procedere al calcolo della freccia  $f_1$ :

$$f_1 = \frac{5}{384} \frac{q_{d,qp} \cdot L^4}{E_c \cdot I_1} = \frac{5}{384} \cdot \frac{17.35 \cdot 5000^4}{10946 \cdot 5568.7 \cdot 10^6} = 2.3 \text{ mm}$$

La freccia complessiva si calcola come combinazione delle frecce  $f_1$  e  $f_2$ :

$$f = f_1 \cdot (1 - \gamma) + f_2 \cdot \gamma$$

$$\gamma = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^2$$

-  $\beta_1 = 0.85$  per barre con classe di aderenza 1 e 0.70 per barre con classe di aderenza 2;

-  $\beta_2 = 0.5$  per carichi di lunga durata.

-  $M_{max}$  è il momento agente nella sezione più sollecitata dell'elemento, da valutarsi con riferimento alla combinazione di carico rara (si veda punto (6) del 7.3), per cui  $M_{max} = M_{max,rara} = 85.94 \text{ kN m}$ .

-  $M_{cr}$  è il momento di prima fessurazione, già calcolato in precedenza come

$$M_{fex} = \frac{B \cdot H^2}{6} f_{ctm} = 52.14 \text{ kN m} \text{ (si osserva che il calcolo esatto del momento tenendo conto del$$

contributo delle barre di FRP fornisce  $M_{fex} = \frac{f_{ctm} \cdot I_1}{(h - x_1)} = 52.90 \text{ kN m}$ , di poco differente dal valore

ottenuto trascurando le armature).

Si ottiene pertanto:

- per barre con classe di aderenza 2:

$$\gamma = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^2 = 1 - 0.5 \cdot 0.7 \cdot \left( \frac{52.14}{85.94} \right)^2 = 0.87$$

$$f = f_1 \cdot (1 - \gamma) + f_2 \cdot \gamma = 0.13 \cdot 2.3 + 0.87 \cdot 20.4 = 18.05 \text{ mm}$$

- per barre con classe di aderenza 1:

$$\gamma = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^2 = 1 - 0.5 \cdot 0.85 \cdot \left( \frac{52.14}{85.94} \right)^2 = 0.84$$

$$f = f_1 \cdot (1 - \gamma) + f_2 \cdot \gamma = 0.16 \cdot 2.3 + 0.84 \cdot 20.4 = 17.56 \text{ mm}$$

In combinazione quasi permanente, si porta in conto anche un contributo aggiuntivo nella freccia dovuto alle deformazioni da ritiro, da calcolarsi come segue:

$$f_{rit} = \frac{1}{8} \cdot \frac{M_{rit}}{E_c I_2} \cdot L^2 = \varepsilon_{rit} \cdot \frac{S_c \cdot L^2}{8 \cdot I_2} = \varepsilon_{rit} \cdot \frac{b \cdot x_2^2}{2} \cdot \frac{L^2}{8 \cdot I_2} = 2.06 \text{ mm}$$

Avendo assunto  $\varepsilon_{rit} = 0.00035$ ,  $I_2 = 631.8 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$ ,  $S_c = \frac{b \cdot x_2^2}{2}$  e  $x_2 = 89.1$ .

La freccia complessiva risulta pertanto:

- per barre di classe di aderenza 2:

$$f_{tot} = f + f_{rit} = 18.05 \text{ mm} + 2.06 \text{ mm} = 20.11 \text{ mm} \rightarrow \frac{f}{L} = \frac{20.11}{5000} = 0.004 < \frac{1}{250} = 0.004$$

- per barre di classe di aderenza 1:

$$f_{tot} = f + f_{rit} = 17.56 \text{ mm} + 2.06 \text{ mm} = 19.65 \text{ mm} \rightarrow \frac{f}{L} = \frac{19.65}{5000} = 0.0039 < \frac{1}{250} = 0.004$$

Si riporta a seguire la sintesi delle verifiche svolte agli SLE e per SLU in termini di numero minimo di barre con diametro nominale  $d_b = 14 \text{ mm}$  necessarie per soddisfare le singole verifiche.

Combinazione di carico	SLE Controllo ampiezza delle fessure	SLE Limitazione delle tensioni	SLE Controllo delle frecce (L/250)	ULS
Quasi permanente	$w_k \leq 0.5 \text{ mm}$ Classe 1: 5 barre $d_b = 14 \text{ mm}$ Classe 2: 5 barre $d_b = 14 \text{ mm}$	3 barre $d_b = 14 \text{ mm}$	Classe 1: 4 barre $d_b = 14 \text{ mm} *$ Classe 2: 4 barre $d_b = 14 \text{ mm} *$	
Frequente	$w_k \leq 0.6 \text{ mm}$			

	Classe 1: 5 barre $d_b = 14$ mm Classe 2: 5 barre $d_b = 14$ mm			
Rara		5 barre $d_b = 14$ mm	Classe 1: 5 barre $d_b = 14$ mm Classe 2: 5 barre $d_b = 14$ mm	
SLU				5 barre $d_b = 14$ mm

\*Comprensiva del ritiro

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

Savoia, Prof. Marco	Università di Bologna
Ceroni, Prof. Francesca	Università di Napoli 'Parthenope'
Ascione, Prof. Luigi	Università di Salerno
Bonati, Ing. Antonio	CNR ITC
Nanni, Prof. Antonio	Università di Miami. USA
Pecce, Prof. Marisa	Università di Napoli Federico II
Poggi, Prof. Carlo	Politecnico di Milano
Prota, Prof. Andrea	Università di Napoli 'Federico II'
Saetta, Prof. Anna	IUAUV, Venezia
Aiello, Prof. Maria A.	Università del Salento
Bilotta, Prof. Antonio	Università di Napoli 'Federico II'
Camata, Prof. Guido	Università di Chieti-Pescara
D'Antino, Prof. Tommaso	Politecnico di Milano
Di Ludovico, Prof. Marco	Università di Napoli 'Federico II'
Ferretti, Ing. Francesca	Università di Bologna
Focacci, Prof. Francesco	Uniecampus
Franco, Ing Annalisa	CNR ITC
Frassine, Prof. Roberto	Politecnico di Milano
Leone, Prof. Marianovella	Università del Salento
Lignola, Prof. Gian Piero	Università di Napoli 'Federico II'
Magliulo, Prof. Gennaro	Università di Napoli 'Federico II'
Mazzotti, Prof. Claudio	Università di Bologna
Monti, Prof. Giorgio	Università di Roma Sapienza
Napoli, Prof. Annalisa	Università di Salerno
Nigro, Prof. Emidio	Università di Napoli 'Federico II'
Pisani, Prof. Marco A.	Politecnico di Milano
Occhiuzzi, Prof. Antonio	Università di Napoli 'Parthenope'
Puppio, Ing. Mario Lucio	Università di Cagliari
Realfonzo, Prof. Roberto	Università di Salerno

Gabriele Balconi	Sireg S.p.A
Paolo Casadei	Owens Corning S.p.A
Aniello Giamundo	ATP s.r.l.
Federico Moroni	SIKA S.p.A
Gianluca Ussia	Fibrenet S.p.A.
Giulio Morandini	Mapei S.p.A

Coordinatori:

SAVOIA Prof. Marco, CERONI Prof. Francesca

Il presente Documento Tecnico è stato approvato in versione preliminare il 11/04/2025 dalla “Commissione incaricata di formulare pareri in materia di normativa tecnica relativa alle costruzioni” così composta:

xxx

xxx

In data xx/xx/2025, 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:

xxx

xxx