Consiglio Nazionale delle Ricerche

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

CNR-DT 203 R1/2026

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

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

2 INTRODUZIONE 2
2.1 CONTENUTI E SCOPO DELLE PRESENTI ISTRUZIONI 2
2.2 SIMBOLOGIA 5
2.3 ACRONIMI 9

3 MATERIALI 10
3.1 PREMESSA 10
3.2 CARATTERISTICHE RICHIESTE 10
3.3 CARATTERISTICHE DELLE BARRE DI FRP 12
3.3.1 Definizione del diametro e dell'area nominali delle barre di FRP 13
3.3.2 Resistenza e modulo di elasticità a trazione in direzione longitudinale 14
3.4 COEFFICIENTI DI DILATAZIONE TERMICA 15
3.5 FATICA STATICA 16
3.6 RETI DI FRP 16
3.7 CONTROLLO PERMANENTE DELLA PRODUZIONE IN STABILIMENTO (FPC) 16
3.8 PROCEDURE DI ACCETTAZIONE IN CANTIERE 17

4 CONCETTI BASILARI DEL PROGETTO 19
4.1 PREMESSA 19
4.2 REQUISITI FONDAMENTALI 19
4.3 VITA DI PROGETTO CONVENZIONALE DELLA STRUTTURA E DURABILITA' 20
4.4 PRINCIPI GENERALI DEL PROGETTO 20
4.4.1 Generalità 20
4.4.2 Azioni di calcolo 20
4.4.3 Capacità resistente di calcolo 20
4.4.4 Proprietà geometriche e meccaniche dei materiali 21
4.5 FATTORI PARZIALI PER I MATERIALI 22
4.6 PROBLEMI SPECIALI DI PROGETTO 22
4.6.1 Fattori di conversione per azioni ambientali e temperatura 22
4.6.2 Fattore di conversione per effetti di lunga durata $\eta_{c,l}$ 23
4.6.3 Comportamento delle barre di FRP sotto alte temperature 25

5 IL MECCANISMO DI ADERENZA 27
5.1 L'ADERENZA DELLE BARRE DI FRP NEL CALCESTRUZZO 27
5.2 MODELLAZIONE DEL LEGAME DI ADERENZA 28
5.3 CARATTERIZZAZIONE DEL LEGAME DI ADERENZA TRAMITE PROVE SPERIMENTALI 30
5.4 LUNGHEZZA DI ANCORAGGIO 31

6 COMPORTAMENTO AGLI STATI LIMITE ULTIMI 34
6.1 VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ RESISTENTE A FLESSIONE E PRESSO-FLESSIONE 34
6.1.1 Fondamenti del calcolo 34
6.1.2 Momento resistente di progetto 34

6.2 PRINCIPI DEL PROGETTO A FLESSIONE SOTTO AZIONI DA INCENDIO 37
6.3 VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ RESISTENTE A TAGLIO 38
6.3.1 Elementi senza armature trasversali resistenti a taglio 38
6.3.2 Elementi con armature trasversali di FRP resistenti a taglio 39
6.3.3 Progetto a taglio sotto azioni da incendio 41
6.4 VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ RESISTENTE A TORSIONE 41
6.5 CONFINAMENTO 41
6.6 VALUTAZIONE DELLA CAPACITA' RESISTENTE IN PRESENZA DI ARMATURE IBRIDE 42
6.6.1 Capacità resistente a flessione e pressoflessione 42
6.6.2 Capacità resistente a taglio 44
6.7 COMPORTAMENTO DELLE STRUTTURE IPERSTATICHE 45
6.8 PARTICOLARI COSTRUTTIVI 45
6.8.1 Indicazioni sul copriferro 45
6.8.2 Indicazioni sulle armature longitudinali 46
6.8.3 Indicazioni sulle armature trasversali 47
6.8.4 Ulteriori dettagli costruttivi 48

7 VERIFICHE AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO 49
7.1 FONDAMENTI DEL CALCOLO 49
7.2 STATO LIMITE DI LIMITAZIONE DELLE TENSIONI 50
7.3 STATO LIMITE DI DEFORMAZIONE 51
7.4 STATO LIMITE DI FESSURAZIONE 53
7.5 VERIFICHE ALLO SLE IN PRESENZA DI ARMATURE IBRIDE 56

8 PRESCRIZIONI IN ZONA SISMICA 58
8.1 PREMESSA 58
8.2 STRUTTURE PER LE QUALI IL SISMA PROVOCA RIDOTTE VARIAZIONI DELLE SOLLECITAZIONI RISPETTO ALLE COMBINAZIONI NON SISMICHE 58
8.3 STRUTTURE PROGETTATE COME NON DISSIPATIVE 59
8.4 STRUTTURE PROGETTATE IN CAMPO DISSIPATIVO 60
8.5 STRUTTURE DI FONDAZIONE 61

9 PRESCRIZIONI RELATIVE ALL'ESECUZIONE 63
9.1 SPEDIZIONE DEL MATERIALE IN CANTIERE 63
9.2 STOCCAGGIO IN CANTIERE 63
9.3 MANIPOLAZIONE IN CANTIERE 63
9.4 POSA IN OPERA 64
9.5 CONTROLLO DELLA POSA IN OPERA 64

10 ALTRE APPLICAZIONI 66
10.1 PREMESSA 66
10.2 BARRE DI FRP COME SISTEMI DI RINFORZO PER STRUTTURE ESISTENTI 66
10.2.1 Rinforzo esterno con tecnica NSM 66
10.2.2 Ristilatura armata di giunti di malta in elementi di muratura 66
10.2.3 Miglioramento della connessione tra elementi di muratura 67
10.3 BARRE DI FRP PER IL CONTENIMENTO DEI TERRENI 69
10.4 BARRE DI FRP PER STRUTTURE TEMPORANEE 71
10.5 BARRE DI FRP COME ARMATURA IN ELEMENTI NON STRUTTURALI 72
10.6 BARRE DI FRP COME ARMATURA DI ELEMENTI ESPOSTI AD INTERFERENZE ELETTROMAGNETICHE 72

11 APPENDICE A: Qualificazione e accettazione in cantiere dei materiali e dei prodotti 74
11.1 QUALIFICAZIONE DELLE BARRE DI FRP 74
11.2 CARATTERISTICHE DELLE BARRE DI FRP 75

12 APPENDICE B: Definizione e calibrazione dei fattori parziali delle barre di FRP 77
12.1 DEFINIZIONE DEI FATTORI PARZIALI 77
12.2 VALUTAZIONE DEL FATTORE PARZIALE DEL MATERIALE, γ_m 77
12.3 VALUTAZIONE DEL FATTORE PARZIALE DELLE BARRE DI FRP γ_f PER VERIFICHE FLESSIONALI 78
12.3.1 Valutazione del fattore parziale delle incertezze geometriche e del modello di resistenza a flessione, γ_{Rd} 78
12.3.2 Valutazione del coefficiente parziale delle barre di FRP γ_f secondo EN 1990 80
12.3.3 Valutazione del coefficiente parziale delle barre di FRP γ_f secondo EN 1992-1-1 80
12.3.4 Valore del coefficiente parziale delle barre di FRP γ_f adottato nelle presenti Istruzioni per verifiche flessionali 81
12.4 VALUTAZIONE DEL FATTORE PARZIALE DELLE BARRE DI FRP γ_f IN PRESENZA DI SOLLECITAZIONI TAGLIANTI E PER IL CONFINAMENTO 81

13 APPENDICE C: Compiti e responsabilità degli operatori nella scelta e nel controllo delle barre di FRP 83

14 APPENDICE D: Calibrazione su base sperimentale della formulazione per il calcolo della freccia in elementi inflessi di calcestruzzo armato con barre di FRP 85

15 APPENDICE E: Il legame di aderenza calcestruzzo-barre di FRP 86
15.1 PREMESSA 86
15.2 FORMULAZIONI TEORICHE PER IL LEGAME DI ADERENZA CALCESTRUZZO-BARRE DI FRP 87
15.3 VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA DI ADERENZA 89
15.4 LUNGHEZZA DI ANCORAGGIO 91

16 APPENDICE F: Metodo di verifica semplificato in condizioni di incendio 97
16.1 GENERALITA' 97
16.2 ANALISI TERMICA 97
16.3 ANALISI MECCANICA 98

17 APPENDICE G: Esempi di calcolo 102
17.1 PROGETTO A FLESSIONE DI TRAVI DI CALCESTRUZZO ARMATE CON BARRE DI FRP 102
17.1.2 Verifiche allo SLU 102
17.1.3 Verifiche allo SLE 105
17.1.4 Sintesi delle verifiche a flessione 115
17.2 PROGETTO A TAGLIO DI TRAVI DI CALCESTRUZZO ARMATE CON STAFFE DI FRP 116
17.2.1 Verifica in appoggio (passo staffe 100 mm) 117
17.2.2 Verifica nella sezione a 1 m dall'appoggio (passo staffe 300 mm) 118

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. L'adozione di armature non metalliche consente, in linea di principio, l'impiego di acqua di mare nel confezionamento del calcestruzzo; tuttavia, ciò richiede un mix design accuratamente progettato per contrastare l'azione aggressiva degli ioni marini, potenzialmente dannosi non solo per le armature tradizionali ma anche per la matrice cementizia. Tale possibilità assume particolare rilevanza nell'ottica della sostenibilità delle costruzioni.

A fronte di questo crescente interesse, negli ultimi anni sono state redatte 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, a sua volta, rappresenta un aggiornamento del documento originariamente 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 (successivamente aggiornato nel 2013, versione R1 e nel 2026, versione R2) per gli interventi di rinforzo di strutture di calcestruzzo armato e di strutture murarie con materiali FRP, il DT 201/2005 per gli interventi di rinforzo di strutture lignee con materiali FRP, il DT 202/2005 per gli interventi di rinforzo di strutture metalliche con materiali FRP.

Le presenti Istruzioni sono state redatte sulla base dello stato attuale delle conoscenze scientifiche 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, fin dagli inizi degli anni '2000, ricercatori italiani 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 (*Fibre Reinforced Polymer*) o per il rinforzo di elementi strutturali esistenti nei quali le barre di FRP siono impiegate come armatura lenta in opportuni ringrossi della sezione originaria di calcestruzzo. Sebbene le prime ricerche, sperimentali e teoriche, 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 solo i criteri di progetto e gli 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 del settore 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 Fabbricanti, sia per quantità di prodotti qualificati e volumi di materiale prodotto, ma vengono prodotte anche barre in fibre di carbonio (CFRP), ed in numero decisamente minore barre in fibre di basalto (BFRP) e di arammide (AFRP).

Nonostante le barre in fibra di carbonio (CFRP) abbiano prestazioni migliori sia in termini di resistenza che di rigidezza rispetto alle altre, 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, inoltre, che gli studi sperimentali ad oggi disponibili, con riferimento sia alle proprietà meccaniche delle singole barre sia al comportamento di elementi in calcestruzzo armati con barre di FRP, riguardano principalmente le barre di GFRP; per le barre di CFRP sono state condotte in passato numerose campagne sperimentali su elementi armati con tali barre, ma sono disponibili pochi dati sulla loro qualificazione, mentre per le barre di BFRP e AFRP la sperimentazione, anche solo con riferimento alle proprietà meccaniche delle singole barre, è assente o molto ridotta, per cui non è possibile, ad oggi, elaborare statistiche affidabili sulle proprietà dei materiali.

Si rileva, inoltre, che la continua evoluzione della tecnologia in questo campo, grazie allo sviluppo di nuovi materiali e tecniche produttive, comporta inevitabilmente la necessità di operare una scelta nella 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, teorica e sperimentale, ha potuto approfondire tutti gli aspetti, 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 potenziali criticità per i materiali attualmente meno utilizzati e per i quali non è ancora disponibile un'adeguata sperimentazione.

In aggiunta alle tipologie di barre di FRP sopra descritte, casi emblematici della continua evoluzione dei materiali e delle tecniche produttive e della conseguente necessità di avere disponibili dati sperimentali sufficienti per fornire indicazioni progettuali affidabili, sono rappresentati, ad esempio, dalle reti bidirezionali in fibra di vetro oppure dalle barre di FRP realizzate 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 documenti di riferimento, quali ad esempio un EAD (Documento per la Valutazione Europea - *European Assessment Document*), 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" emessa 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 (GFRP e CFRP) 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), oppure che abbiano un CVT (Certificato di Valutazione Tecnica) redatto in conformità con la Linea Guida del CSLLPP precedentemente citata. In entrambi i casi, la qualificazione delle barre di FRP deve essere relativa almeno alle caratteristiche geometriche e meccaniche ritenute obbligatorie per la progettazione e specificate in questo documento.
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 (BFRP e AFRP) 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. L'estensione del campo di applicabilità delle presenti Istruzioni a tali barre potrà essere valutata solo quando sarà disponibile un numero statisticamente significativo di prodotti qualificati secondo EAD 260023-00-0301 o Linea Guida del CSLLPP, corredati da una adeguata sperimentazione su 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 dei materiali FRP, caratterizzati da un legame costitutivo essenzialmente elastico lineare fino a rottura, che, quindi, non presenta risorse apprezzabili di duttilità. Pertanto, non sono applicabili quei metodi dell'analisi strutturale che presuppongono una capacità di ridistribuzione plastica nell'elemento ed è richiesta particolare attenzione per le applicazioni in zona sismica, per le quali 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 suo insieme. Nel primo caso, le prestazioni in termini di duttilità richiedono necessariamente l'utilizzo di armature 'ibride', cioè occorre prevedere l'uso accoppiato di armature di FRP e di acciaio nelle zone critiche dove si possono formare le cerniere plastiche. Nel secondo caso, è possibile utilizzare solo armature di FRP. Una terza casistica, di grande rilievo in molte applicazioni, quali ad esempio gli elementi strutturali che compongono gli impalcati da ponte, è quella in cui le combinazioni di azioni non sismiche sono più rilevanti di quelle sismiche; anche in questo caso è possibile prevedere l'utilizzo di sole armature di FRP.
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 controllo della deformabilità che della fessurazione. Ciò è particolarmente rilevante per le strutture rinforzate con barre in fibra di vetro (GFRP), che presentano una maggiore resistenza a trazione delle armature metalliche, ma un modulo elastico pari ad un terzo.
Infine, per quanto riguarda l'aderenza barra di FRP – calcestruzzo, prove sperimentali hanno evidenziato che le attuali tecniche di preparazione superficiale delle barre consentono di raggiungere in alcuni casi proprietà di aderenza comparabili o superiori a quelle delle barre in acciaio, 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.

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. 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 dell'esame di un esteso database sperimentale, la valutazione della riduzione di resistenza a trazione delle barre per effetto di carichi di lunga durata (*creep rupture*), la definizione di classi di qualità dell'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 (Capitolo 10) 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 quali la leggerezza ed il ridotto modulo elastico possono aprire interessanti prospettive di utilizzo di tali barre, come ad esempio nella realizzazione di opere a carattere provvisionale, di rivestimenti di gallerie, di paratie prospicienti zone marine, nell'utilizzo come armatura di pavimentazioni e come tiranti per il contenimento di terreni. Di grande interesse anche l'utilizzo delle barre di FRP per il rinforzo di strutture esistenti con la tecnica NSM (*Near Surface Mounted*), sia per applicazioni su elementi in muratura in zona sismica che in calcestruzzo armato degradato (ad esempio nelle infrastrutture). In quest'ultimo caso, l'uso combinato delle barre di FRP 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 come tiranti per il miglioramento delle connessioni in elementi di muratura. Si precisa tuttavia che, anche per queste applicazioni, il Documento non fornisce specifiche indicazioni progettuali, ma si segnala che l'ultima versione del DT 200 (revisione R2 del 2026) riporta indicazioni progettuali per interventi di rinforzo in elementi in c.a. e muratura realizzati con barre in FRP applicate con la tecnica NSM.

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

- ACI 440.1R (2015). *Design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA;
- ACI CODE-440.11-22 (2022). *Building Code requirements for structural concrete reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars—Code and commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills MI;
- AFGC (2023). *Recommendations for the use of FRP (Fibre Reinforced Polymer) rebars for reinforced concrete structures*, Association Francaise de Genie Civil;
- CEN (2023). *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, Annex R, EN 1992-1-1:2004;
- *fib* Model Code 2020 (2024). *fib Model Code for concrete structures* 2020, federation international du beton, Lausanne, Switzerland;
- *fib* bulletin n.40 (2007). *FRP reinforcement for RC structures*, Task Group 9.3 *(Fibre Reinforced Polymer)* Reinforcement for Concrete Structures, federation international du beton, Lausanne, Switzerland;
- CAN/CSA S806-2017, (2021). *Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers*, Canadian Standard Association (CSA) International, Toronto, Ontario, Canada;

- 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

Simbolo	Definizione
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
$A_{c,ef}$	area di calcestruzzo efficace in trazione
A_f	area delle armature longitudinali di FRP
A_{fc}	area delle armature longitudinali di FRP in zona compressa
A_{fw}	area dell'armatura trasversale di FRP (staffe)
B_s	larghezza del braccio della staffa di FRP
D_{max}	massimo diametro degli inerti nel calcestruzzo
E_c	modulo di elasticità normale istantaneo del calcestruzzo
$E_{c,eff}$	modulo elastico efficace del calcestruzzo che tiene conto degli effetti reologici
E_f	modulo di elasticità longitudinale a trazione della barra di FRP
E_{fc}	modulo di elasticità longitudinale a compressione della barra di FRP
E_s	modulo di elasticità longitudinale a trazione della barra di acciaio
I_1	momento di inerzia della sezione in calcestruzzo armata con barre di FRP in condizione non fessurata
I_2	momento di inerzia della sezione in calcestruzzo armata con barre di FRP in condizione fessurata
L_t	lunghezza della staffa di FRP oltre la sagomatura
M_{max}	momento agente nella sezione più sollecitata dell'elemento
M_{cr}	momento di prima fessurazione della sezione in calcestruzzo armata con barre di FRP
M_{Rd}	momento flettente resistente di progetto
$M_{Rd,fi,t}$	momento flettente resistente di progetto in caso di assenza di protezione al fuoco e di esposizione al fuoco dal lato delle fibre in tensione
M_{Ed}	momento flettente sollecitante di progetto
N_{Rd}	sforzo normale resistente di progetto
N_{Ed}	sforzo normale sollecitante di progetto
P_{fib}	frazione in peso delle fibre nella barra di FRP
$R_{et,t}^{1000}$	percentuale residua della resistenza media a trazione della barra di FRP dopo 1000 ore di esposizione in ambiente alcalino e con carico sostenuto
$R_{et,t}^{3000}$	percentuale residua della resistenza media a trazione della barra di FRP dopo 3000 ore di esposizione in ambiente alcalino
T_{pm}	temperatura di fusione della barra di FRP
T_g	temperatura di transizione vetrosa della barra di FRP

T_{max}	temperatura massima di esercizio della barra di FRP
V_{fib}	frazione volumetrica delle fibre nella barra di FRP
V_{Rd}	resistenza di progetto a taglio
$V_{Rd,ct}$	contributo alla resistenza di progetto a taglio relativo ai meccanismi del calcestruzzo
$V_{Rd,f}$	contributo alla resistenza di progetto a taglio delle staffe di FRP
$V_{Rd,c}$	resistenza di progetto a taglio della biella compressa di calcestruzzo
V_{Ed}	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

Simbolo	**Definizione**
b	larghezza della sezione rettangolare in calcestruzzo
b_w	larghezza minima della sezione in calcestruzzo
c	distanza del baricentro delle barre di FRP dal bordo della sezione (copriferro meccanico)
c_{geom}	distanza del bordo delle barre di FRP dal bordo della sezione (copriferro geometrico)
d	distanza del baricentro delle barre di FRP in trazione dal bordo compresso della sezione (altezza utile delle barre di FRP)
d_b	diametro nominale della barra di FRP
d_{ba}	diametro nominale della barra di acciaio
d_{bs}	diametro nominale della staffa di FRP
$d_{b,eff}$	diametro effettivo della barra di FRP
d_s	distanza del baricentro delle barre di acciaio dal bordo compresso della sezione (altezza utile delle barre di acciaio)
f	freccia dell'elemento strutturale
f_1	freccia dell'elemento strutturale calcolata nell'ipotesi di sezione non fessurata
f_2	freccia dell'elemento strutturale 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 trazione a fatica della barra di FRP (valore medio o caratteristico)
f_{fc}	resistenza a compressione media della barra di FRP
f_{fck}	resistenza a compressione caratteristica della barra di FRP
f_{ftd}	resistenza a trazione di progetto della barra di FRP
f_{ftk0}	resistenza a trazione caratteristica della barra di FRP
$f_{ftk,c}$	resistenza a trazione caratteristica della barra di FRP per fatica statica (*creep rupture*) a 100 anni
$f_{ftk,ca}$	resistenza a trazione caratteristica della barra di FRP per fatica statica (*creep rupture*) a 100 anni dopo esposizione ad ambiente alcalino
$f_{ftk,st}$	resistenza a trazione caratteristica della parte rettilinea del braccio della staffa di FRP
f_{ubk}	resistenza a trazione caratteristica della parte piegata della staffa di FRP
$f_{ubk,a}$	resistenza a trazione caratteristica della parte piegata della staffa di FRP dopo l'esposizione in ambiente alcalino
f_{yd}	tensione di snervamento di progetto delle barre di acciaio
$f_{c,FRP}$	resistenza a compressione della barra di FRP (valore medio o caratteristico)
h	altezza della sezione in calcestruzzo
$h_{c,ef}$	altezza del calcestruzzo efficace in trazione

$k_{l/r}$	fattore geometrico che tiene conto dell'effetto della curvatura della trave sull'apertura delle fessure
$k_{\phi/r}$	fattore funzione della distribuzione delle tensioni tangenziali lungo le barre
k_b	fattore funzione della posizione delle barre di FRP durante il getto
k_{bond}	fattore funzione della classe di aderenza della barra di FRP per le condizioni di esercizio
k_{fl}	fattore funzione della distribuzione delle tensioni nel calcestruzzo prima della fessurazione
k_t	coefficiente funzione della durata e della natura del carico applicato
ℓ_a	lunghezza di ancoraggio della barra di FRP
ℓ_{ad}	lunghezza di ancoraggio di progetto della barra di FRP
$\ell_{ad,fi,t}$	lunghezza di ancoraggio di progetto della barra FRP al tempo t in condizioni di incendio
ℓ_b	lunghezza aderente della barra di FRP
$\ell_{ad,tot}$	lunghezza della zona che non deve essere esposta direttamente all'azione incendio per garantire il corretto ancoraggio delle barre
m	coefficiente nel modello semplificato di *tension-stiffening*
q	fattore di comportamento della struttura
s	passo delle staffe di FRP
s	scorrimento all'interfaccia barra FRP-calcestruzzo
$s_{r,max}$	distanza massima tra le fessure
x	distanza dell'asse neutro dal bordo compresso della sezione in calcestruzzo per verifiche allo SLU
x_1	distanza dell'asse neutro dal bordo compresso della sezione in condizione non fessurata per verifiche agli SLE
x_2	distanza dell'asse neutro dal bordo 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

Simbolo	**Definizione**
α_f	coefficiente di omogeneizzazione barra di FRP-calcestruzzo
α_s	coefficiente di omogeneizzazione barra di acciaio-calcestruzzo
α_R	fattore di sensibilità secondo il First Order Reliability Method (FORM)
$\alpha_{sp,L}$	coefficiente di dilatazione termica longitudinale della barra di FRP
$\alpha_{sp,T}$	coefficiente di dilatazione termica trasversale della barra di FRP
β	indice di affidabilità, funzione della classe di conseguenza della struttura e del periodo di ritorno
β_1	coefficiente adimensionale che tiene conto della qualità dell'aderenza della barra di FRP
β_2	coefficiente adimensionale che tiene conto della durata dei carichi
β_w	coefficiente che determina il valore massimo della distanza tra le fessure a partire dal valore medio
γ	coefficiente di *tension – stiffening* per il calcestruzzo teso
γ_c	fattore parziale del calcestruzzo
γ_f	fattore parziale delle barre di FRP

γ_m	fattore parziale del materiale
γ_{Rd}	fattore parziale per il modello di resistenza e le deviazioni geometriche
$\gamma_{Rd,geo}$	fattore parziale per le deviazioni geometriche
$\gamma_{Rd,mod}$	fattore parziale per il modello di resistenza
$\varphi(t,t_0)$	coefficiente di viscosità del calcestruzzo
ε_c	deformazione corrente del calcestruzzo al lembo compresso
ε_{cu}	valore di progetto della deformazione ultima nel calcestruzzo
ε_f	deformazione corrente nelle barre tese di FRP
ε_{ftd}	valore di progetto della deformazione ultima a trazione della barra di FRP
ε_{ftk}	valore caratteristico della deformazione ultima a trazione della barra di FRP
$\varepsilon_{fu,T}$	valore di progetto della deformazione ultima a trazione della barra di FRP in funzione della temperatura raggiunta nella barra in caso di incendio
ε_s	deformazione corrente nelle barre tese di acciaio
$\varepsilon_{T,f}$	aliquota di deformazione termica nella barra di FRP funzione della temperatura raggiunta nella barra in caso di incendio
ε_{yd}	valore di progetto della deformazione di snervamento delle barre di acciaio
ε_{fm}	valore medio delle deformazioni nelle barre di FRP tra due fessure successive
ε_{cm}	valore medio delle deformazioni nel calcestruzzo teso tra due fessure successive
η_a	fattore di conversione ambientale
η_T	fattore di conversione per effetti della temperatura
$\eta_{c,l}$	fattore di conversione per effetti di fatica statica (*creep rupture*) per carichi di lunga durata
η_c	fattore di conversione per effetti di fatica statica (*creep rupture*) a 100 anni
η_{ca}	fattore di conversione per fatica statica (*creep rupture*) a 100 anni dopo esposizione in ambiente alcalino
$\rho_E(T)$	fattore di riduzione del modulo elastico alla temperatura T nella barra al tempo *t*
ρ_l	percentuale di armatura tesa longitudinale rispetto all'area della sezione in calcestruzzo, A_c
$\rho_{l,ef}$	percentuale efficace di armatura tesa longitudinale rispetto all'area di calcestruzzo teso efficace, $A_{c,ef}$
$\rho_f(T)$	fattore di riduzione della resistenza alla temperatura T raggiunta dalla barra al tempo *t*
ρ_s	percentuale di armatura trasversale (staffe) di FRP
σ_c	tensione normale di compressione nel calcestruzzo
σ_f	tensione normale di trazione nelle barre di FRP
$\sigma_{f,qp}$	tensione normale di trazione elle barre di FRP nella combinazione dei carichi quasi-permanente
σ_s	tensione normale di trazione nelle barre di acciaio
τ_b	resistenza di aderenza (da prove di estrazione da supporti in calcestruzzo di classe C20/25)
$\tau_{b,a}$	resistenza di aderenza dopo esposizione ad ambiente alcalino (da prove di estrazione da supporti in calcestruzzo di classe C20/25)
$\tau_{b,C50/60}$	resistenza di aderenza (da prove di estrazione da supporti in calcestruzzo di classe C50/60)
$\tau_{b,cb}$	resistenza di aderenza (da prove di estrazione da supporti in calcestruzzo di classe C20/25 con barra in posizione eccentrica con copriferro c_b)
$\tau_{b,Tmax}$	resistenza di aderenza alla massima temperatura di esercizio (da prove di estrazione da supporti in calcestruzzo di classe C20/25)
τ_i	resistenza a taglio interlaminare della barra di FRP

τ_{mf}	resistenza media di aderenza all'interfaccia barre in FRP - calcestruzzo teso nel tratto tra due fessure successive in condizioni di esercizio (SLE)
τ_s	resistenza a taglio trasversale della barra di FRP
χ	fattore di riduzione della resistenza caratteristica a trazione della parte piegata rispetto alla parte rettilinea
χ_a	fattore di riduzione della resistenza caratteristica della parte piegata rispetto alla parte rettilinea dopo esposizione in ambiente alcalino

2.3 ACRONIMI

CPR	Regolamento sui prodotti da costruzione (*Construction Products Regulation*)
CVT	Certificato di Valutazione Tecnica
DoPC	Dichiarazione di Prestazione e Conformità (*Declaration of Performance and Conformity*)
CCPC	Certificato di Costanza della Prestazione e di Conformità del prodotto
EAD	Documento per la Valutazione Europea (*European Assessment Document*)
ETA	Valutazione Tecnica Europea (*European Technical Assessment*)
FPC	Controllo della produzione in fabbrica (*Factory Production Control*)
FRP	Fibre Reinforced Polymer
GFRP	Glass Fibre Reinforced Polymer
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Polymer
NSM	Near Surface Mounted bars
SLC	Stato Limite di Collasso
SLE	Stato Limite di Esercizio
SLU	Stato Limite Ultimo
SLV	Stato Limite di Salvaguardia della Vita
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 possiedano le caratteristiche obbligatorie qualificate e superiori a valori di soglia secondo quanto riportato nel presente capitolo, anche con riferimento alla durabilità. Per quanto siano prodotte 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 delle presenti Istruzioni.

(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. Sarà possibile in futuro estendere il campo di applicazione anche a barre con sezioni diverse da quella circolare solo a valle di adeguata sperimentazione ed aggiornamento delle presenti Istruzioni.

(3) Ai fini dell'applicazione delle presenti Istruzioni, è necessario che le barre di cui al punto (1) siano qualificate mediante marcatura CE redatta sulla scorta di una Valutazione Tecnica Europea (ETA, *Evaluation Technical Assessment*) secondo l'uso previsto ("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") nell'EAD 260023-00-0301 e successive revisioni, in seguito indicato per brevità come *EAD-barre FRP*, o mediante Certificato di Valutazione Tecnica (CVT) redatto 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) 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 nella Tabella 3-1. Nell'Appendice A sono riportate altre caratteristiche utili alla qualificazione delle barre di FRP.

(2) Con riferimento alle prove finalizzate a verificare la durabilità delle barre di FRP, si evidenzia che i valori minimi indicati nella Tabella 3-1 rappresentano delle soglie di accettabilità a seguito di procedure di invecchiamento accelerate e che non sono necessariamente rappresentative delle reali condizioni di esposizione delle barre di FRP.

(3) I prodotti con marcatura CE si intendono qualificati ai fini del presente documento se accompagnati da DoPC dichiarante le prestazioni relative alle caratteristiche riportate nella Tabella 3-1.

Tabella 3-1 – Caratteristiche obbligatorie delle barre di FRP e relativi limiti di accettabilità

Caratteristica obbligatoria	**Simbolo [unità di misura]**	**Riferimento normativo**	**Limite di accettabilità**
Area effettiva	$A_{b,eff}$ [mm^2]	*EAD-barre FRP* §2.2.1 *LG-barre FRP* – Tab. 1	Tabella 3-2
Diametro effettivo	$d_{b,eff}$ [mm]	*EAD-barre FRP* §2.2.1 *LG-barre FRP* – Tab. 1	Tabella 3-2
Frazione volumetrica delle fibre o Frazione in peso delle fibre[1]	V_{fib} [%] P_{fib} [%]	*LG-barre FRP* – Tab. 1	≥ 50% (in volume) ≥ 70% (in peso)
Resistenza a trazione caratteristica	f_{ftk0} [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	≥ 100 °C
Massima temperatura di esercizio	T_{max} [°C]	*EAD-barre FRP* §2.2.13 *LG-barre FRP* – Tab. 1	punto (5) del § 4.1.
Resistenza a taglio trasversale[2] (valore caratteristico)	τ_s [MPa]	*EAD-barre FRP* §2.2.5 *LG-barre FRP* – Tab. 2	≥ 115
Resistenza a taglio interlaminare (valore medio)	τ_i [MPa]	*EAD-barre FRP* §2.2.6 *LG-barre FRP* – Tab. 2	≥ 38
Resistenza di aderenza all'estrazione (*pull-out*) da supporto in calcestruzzo di classe C20/25 (valore medio)	τ_b [MPa]	*EAD-barre FRP* §2.2.4 *LG-barre FRP* – Tab. 2	≥ 7.0
Percentuale residua di resistenza media a trazione in ambiente alcalino per 3000 ore a 60 °C	$R_{et,t}^{3000}$ [%]	*EAD-barre FRP* §2.2.16 *LG-barre FRP* – Tab. 2	barre GFRP: ≥ 60%[3] ≥ 80%[4] barre CFRP: ≥ 85%[3] ≥ 95%[4]
Per barre di FRP sagomate (staffe o barre piegate) - Raggio di curvatura	r_t [mm]	*EAD-barre FRP* §D2 *LG-barre FRP* – Tab. 1	$2r_t \geq 7\ d_b$
- Resistenza caratteristica a trazione della parte rettilinea	$f_{ftk,st}$ [MPa]	*EAD-barre FRP* §2.2.15 *LG-barre FRP* – Tab. 2	Classi secondo Tabella 3-3 di queste Istruzioni
- Resistenza caratteristica a trazione della parte piegata[5]	f_{ubk} [MPa]	*EAD-barre FRP* §2.2.15 *LG-barre FRP* – Tab. 2	≥ 40% $f_{ftk,st}$
- Fattore di riduzione della resistenza della parte piegata rispetto alla parte rettilinea dopo esposizione in ambiente alcalino per 3000 ore a 60°C	χ_a [%][6]	*EAD-barre FRP* §2.2.15	barre GFRP: ≥ 60%[3] ≥ 80%[4] barre CFRP: ≥ 85%[3] ≥ 95%[4]

[1] Tale caratteristica non è dichiarata in DoPC, ma sarà cura del Fabbricante riportarne il valore in una dichiarazione da lui sottoscritta.

[2] La resistenza a taglio trasversale si intende valutata con riferimento al diametro effettivo della barra.

[3] Tale soglia di accettabilità è applicabile se la prova è condotta secondo le modalità indicate *nell'EAD-barre FRP*, adottando, come previsto nella ISO 10406-1:2015, una soluzione con pH iniziale > 13 e costituita da 8.0 g di NaOH e 22.4 g di KOH per ogni litro di acqua deionizzata.

[4] Tale soglia di accettabilità è applicabile se la prova è condotta secondo le modalità indicate *nell'EAD-barre FRP*, ma adottando una soluzione con pH iniziale compreso tra 12.6 a 13.0 e costituita da 118.5 g di $Ca(OH)_2$, 0.9g di NaOH e 4.2 g di KOH per ogni litro di acqua deionizzata.

[5] La modalità di crisi rilevata nella prova non deve essere per sfilamento, in quanto ciò evidenzierebbe 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 10 volte il diametro nominale della barra, d_b.

[6] Il fattore di riduzione della resistenza della parte piegata rispetto alla parte rettilinea dopo esposizione in ambiente alcalino per 3000 ore a 60 °C corrisponde a $\chi_a = f_{ubk,a} / f_{ubk}$, essendo $f_{ubk,a}$ il valore caratteristico della resistenza a trazione della parte piegata dopo l'esposizione in ambiente alcalino per 3000 ore a 60 °C e f_{ubk} la resistenza caratteristica a trazione della parte piegata in condizioni ordinarie.

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

(4) 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. Con riferimento ai risultati delle prove di estrazione (pull-out) da supporti in calcestruzzo e, in particolare, al valore della corrispondente caratteristica essenziale, la resistenza di aderenza τ_b, riportata in Tabella 3-1, è possibile definire per una specifica 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 che li costituiscono, 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, 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 §3.3.1. Le classi delle barre di FRP sono specificate nel §3.3.2. Nei calcoli dovranno essere utilizzati i valori di resistenza e modulo elastico corrispondenti alla classe scelta per la barra di FRP e l'area nominale della barra di FRP.

(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 rettilinee di uguale diametro nominale, l'assegnazione ad una delle classi definite nel §3.3.2 può riferirsi alle proprietà meccaniche delle barre rettilinee di uguale diametro, purché si valutino anche le caratteristiche relative alla parte piegata. Qualora le barre sagomate siano ottenute con un processo produttivo diverso da quello seguito per ottenere le barre rettilinee di uguale diametro nominale, esse devono considerarsi come un prodotto diverso che richiede, pertanto, un processo di qualificazione ad-hoc. In questo caso, le caratteristiche riportate in Tabella 3-1 e la conseguente assegnazione ad una delle classi definite nel §3.3.2 devono esser valutate sulla parte rettilinea della barra sagomata. Nel

caso di barre realizzate 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 Definizione del diametro e dell'area nominali delle barre di FRP

(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.

(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. È possibile associare un dato diametro nominale e la corrispondente area nominale, A_b, ad una barra di FRP se la sua area effettiva $A_{b,eff}$ ricade negli intervalli riportati in Tabella 3-2 ($A_{b,min} \leq A_{b,eff} < A_{b,max}$), essendo l'area effettiva misurata secondo le metodologie indicate nei documenti di qualificazione sopra citati. 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 sono assunte le stesse tolleranze.

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

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^2]**	**Area minima $A_{b,min}$ [mm^2]**	**Area massima $A_{b,max}$ [mm^2]**
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

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 della specifica tecnologia di produzione utilizzata. Per le modalità di prova ed il controllo della costanza della produzione occorre far riferimento alle procedure indicate nell'*EAD-barre FRP* o nella *LG-barre FRP*. In particolare, la resistenza e il modulo di elasticità a trazione delle barre devono essere ottenuti 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, valutata in condizioni ambientali standard, f_{ftk0}.

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 di FRP.

(3) La Tabella 3-3 riporta la definizione delle 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 aventi diversi diametri nominali devono ricadere nella stessa classe. Qualora nell'ambito dello stesso prodotto, barre con diversi diametri nominali esibiscano, nella fase di qualificazione, valori del modulo elastico e della resistenza a trazione ricadenti in classi differenti, la classificazione del prodotto 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 con fibre di vetro e carbonio

Classe E_f/f_{ftk0}	**Tipo di fibra**	**Modulo elastico medio a trazione, E_f [GPa]**	**Resistenza caratteristica a trazione, f_{ftk0} [MPa]**
E45/850	Vetro	45	850 per diametri $d_b < 24$ mm 750 per diametri $d_b \geq 24$ mm
E50/1000	Vetro	50	1000 per diametri $d_b < 24$ mm 900 per diametri $d_b \geq 24$ mm
E60/1100	Vetro	60	1100 per diametri $d_b < 24$ mm 1000 per diametri $d_b \geq 24$ mm
C130/1000	Carbonio	130	1000 per qualsiasi diametro

3.4 COEFFICIENTI DI DILATAZIONE TERMICA

(1) I coefficienti di dilatazione termica delle barre di FRP in direzione longitudinale, α_l, e trasversale, α_t, sono strettamente correlati a quelli delle singole fasi (matrice e fibre) che costituiscono il materiale composito ed alle relative frazioni volumetriche: in generale, il coefficiente 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 α_l tende, infatti, sempre di più a quello delle fibre.

(2) Valori tipici dei coefficienti di dilatazione termica longitudinale e trasversale, rispettivamente α_l e α_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%. È consigliato utilizzare barre che abbiano un coefficiente di dilatazione termica trasversale α_t non superiore a 40.0 10^{-6} °C^{-1}. Valori dei coefficienti di dilatazione termica trasversale delle barre di FRP maggiori di quelli del calcestruzzo possono, infatti, determinare l'insorgere di fessure da splitting nel calcestruzzo per valori elevati della temperatura, se non si prevede un idoneo ricoprimento di calcestruzzo che svolga un'adeguata azione di confinamento.

Tabella 3-4 – Valori tipici dei coefficienti di dilatazione termica per barre di FRP

Tipo di fibra	**α_l [10^{-6} °C^{-1}]**	**α_t [10^{-6} °C^{-1}]**
Carbonio	-9.0 ÷ 0.0	74.0 ÷ 104.0
Vetro	6.0 ÷ 10.0	21.0 ÷ 23.0

3.5 FATICA STATICA

1) Le barre di FRP sono sensibili al fenomeno della fatica statica (nota nella terminologia anglosassone come "*creep rupture*"), che può indurre un progressivo degrado nel tempo di alcune proprietà meccaniche delle barre di FRP (per esempio resistenza a trazione, deformazione ultima e modulo di elasticità longitudinale) in presenza di carichi di lunga durata. Tale fenomeno, dovuto alla redistribuzione degli sforzi tra fibre e matrice causata dalla deformazione viscosa della matrice stessa, risulta fortemente influenzato anche da fattori di tipo ambientale, quali temperatura e umidità. In genere le matrici termoindurenti (esteri vinili, resine epossidiche e fenoliche) sono meno viscose di quelle termoplastiche (polipropileni, 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 minore percentuale in volume di fibre. Le barre di FRP con fibre di carbonio sono meno suscettibili alla rottura da fatica statica rispetto a quelle con fibre di vetro.

(2) Per mitigare gli effetti della viscosità della matrice ed evitare la rottura delle barre per fatica statica, i valori delle tensioni di trazione nelle barre di FRP 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, come indicato nel §4.6.2.

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 fibra di carbonio o vetro nelle due direzioni, purché l'assemblaggio non alteri alcuna delle proprietà geometriche e meccaniche delle singole barre costituenti la rete, che devono essere qualificate secondo le procedure indicate nei vigenti documenti di qualificazione (*EAD-barre 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 in futuro 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 elementi 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 rego-

lamentato dal §3.2 del documento europeo di qualificazione *EAD-barre FRP*.

3.8 PROCEDURE DI ACCETTAZIONE IN CANTIERE

(1) Le procedure per l'accettazione in cantiere sono riportate in dettaglio nelle *LG-barre FRP*. 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 ogni prodotto (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 dimostrano la provenienza da uno stesso stabilimento. In caso contrario, i controlli devono essere estesi ai lotti provenienti da tutti gli stabilimenti.

(2) Per i prodotti qualificati mediante CVT, sui campioni prelevati in cantiere secondo le modalità e nel numero indicati al punto (1) secondo quanto specificato nelle *LG-barre FRP*, devono essere eseguite le misure geometriche e le prove meccaniche 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

	Caratteristica	**Simbolo [unità misura]**	**Limite di accettabilità**
Misure geometriche	- Area effettiva della barra	$A_{b,eff}$ [mm^2]	Compresa entro le tolleranze riportate in Tabella 3-1 rispetto al valore nominale dichiarato dal Fabbricante per quel diametro
	- Raggio di sagomatura delle staffe	r_t [mm]	$2r_t \geq 7\ d_b$
Prove meccaniche	Resistenza a trazione[1]	f_{ft} [MPa]	≥ 95% del valore caratteristico certificato, f_{ftk0}
	Modulo elastico longitudinale medio[2]	E_f [GPa]	≥ 95% del valore medio certificato, E_f
	Deformazione a rottura[1]	ε_{ft} [mm/mm]	≥ 95% del valore caratteristico certificato, ε_{ftk0}
	Resistenza a trazione della parte rettilinea della staffa[1]	$f_{ft,st}$ [MPa]	≥ 95% del valore caratteristico certificato, $f_{ftk,st}$

[1] La disuguaglianza deve essere rispettata per il risultato di ciascun provino

[2] La disuguaglianza deve essere rispettata per il valore medio dei tre provini

(3) Le prove 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 congruo 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 Fabbricante, 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 Fabbricante 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* (CCPC) 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). 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 coinvolti nella progettazione, realizzazione e controllo di strutture realizzate con barre in FRP.

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 nelle presenti Istruzioni.

(2) In tutte le verifiche non si deve fare affidamento sui contributi di resistenza e di rigidezza forniti da barre compresse di FRP o dai tratti di esse soggette a tensioni di compressione. Tuttavia, è consentito nei calcoli di non detrarre l'area di calcestruzzo corrispondente alle barre di FRP 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 ridistribuzione. Anche le verifiche delle costruzioni in zona sismica devono tenere in debito conto l'assenza di duttilità, si veda il Capitolo 8 per dettagli.

(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 massima di esercizio delle barre di FRP dichiarata dal Fabbricante, 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 nelle fasi iniziali dell'incendio, 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, la temperatura delle barre non superi 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. Il paragrafo 6.2 e l'Appendice F forniscono metodi semplificati di progettazione e verifica applicabili, in determinate condizioni, per assicurare 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'idonea cura nella progettazione delle strutture;

- la definizione di opportune procedure di controllo nella produzione dei materiali, la realizzazione delle strutture, il loro uso e la manutenzione.

4.3 VITA DI PROGETTO CONVENZIONALE DELLA STRUTTURA E DURABILITA'

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

(2) La struttura deve essere progettata tenendo conto sia delle condizioni ambientali sia del programma di manutenzione previsto.

(3) Per assicurare un'adeguata 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.

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

(5) Problemi speciali di progetto (azioni ambientali, modalità di carico, ecc.) devono essere identificati in fase di progettazione al fine di valutare la loro importanza in relazione alla durabilità delle barre di FRP nelle effettive condizioni d'uso.

4.4 PRINCIPI GENERALI DEL PROGETTO

4.4.1 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, relativamente sia a condizioni ultime (SLU) sia di esercizio (SLE). Deve cioè risultare che $E_d \le R_d$, dove E_d ed R_d sono, rispettivamente, i valori di progetto degli effetti delle azioni applicate (sollecitazioni, deformazioni, ecc.) prese in considerazione nella verifica e delle corrispondenti capacità (espresse 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 nelle presenti Istruzioni per le barre di FRP (si veda § 4.5).

4.4.2 Azioni di calcolo

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

4.4.3 Capacità resistente di calcolo

(1) Con riferimento alla verifica $E_d \le R_d$ nei riguardi di una generica sollecitazione E_d per un dato stato limite, la capacità resistente di calcolo, R_d, è esprimibile come:

$$R_d = R\left\{X_{d,i}; a_{d,i}\right\} = R\left\{\eta \frac{X_{k,i}}{\gamma_m \cdot \gamma_{Rd}}; a_{d,i}\right\}. \quad (4.1a)$$

Nella (4.1a) $R\{\cdot\}$ è un'opportuna funzione riconducibile allo specifico modello di resistenza considerato i cui argomenti sono, in generale, parametri meccanici X_i e geometrici $a_{,i}$, di cui $X_{d,i}$ e $a_{d,i}$ sono i valori di progetto (EN 1992-1-1:2023). Inoltre, nella (4.1a), γ_m è il fattore parziale che tiene conto delle incertezze del materiale, γ_{Rd} è il fattore parziale che tiene conto delle incertezze insite nel modello di resistenza considerato e delle incertezze geometriche, ed η è il fattore di conversione che tiene conto complessivamente della riduzione delle proprietà meccaniche per effetto dell'esposizione a condizioni ambientali diverse da quelle ordinarie, quali umidità e temperatura, dell'invecchiamento, di effetti di scala, e di qualsiasi altro parametro rilevante.
La (4.1a) può anche essere scritta come segue:

$$R_d = R\left\{\eta \frac{X_{k,i}}{\gamma_f}; a_{d,i}\right\} \quad (4.1b)$$

(2) Nella (4.1b), si è utilizzato l'approccio semplificato proposto dall'Eurocodice 0 (EN 1990:2023), secondo cui i fattori parziali γ_m e γ_{Rd} sono combinati in un unico fattore γ_f, indicato come fattore parziale delle barre di FRP, come segue:

$$\gamma_f = \gamma_m \cdot \gamma_{Rd} \quad (4.2)$$

(3) Il fattore γ_{Rd}, e di conseguenza γ_f, potrà essere differenziato in funzione del tipo di sollecitazione a cui le barre di FRP sono soggette. Maggiori dettagli sulle procedure di valutazione di γ_{Rd}, γ_m e γ_f sono riportati nell'Appendice B.

4.4.4 Proprietà geometriche e meccaniche 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 queste Istruzioni 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 di materiali definite 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 (ad esempio, i moduli elastici) sono valutati attraverso i corrispondenti valori medi. In assenza di specifiche tecniche delle barre di FRP da utilizzarsi, si devono considerare, per le verifiche riportate nelle presenti Istruzioni, i valori di resistenza e modulo elastico corrispondenti alla classe prescelta tra quelle definite 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 corrispondenti alle classi definite in Tabella 3-3 e purché le caratteristiche obbligatorie siano state ottenute sulla base di qualificazione eseguita secondo *EAD-barre FRP* o *LG-barre FRP*, è possibile utilizzare nei calcoli le resistenze effettive fornite dal Fabbricante per quello specifico prodotto.

(3) Il valore di calcolo della resistenza a trazione o della corrispondente deformazione (in entrambi i casi sotto espresso dal simbolo X_d) della barra di FRP è dato, in forma generale, dalla seguente relazione:

$$X_d = \eta_T \cdot \eta_a \cdot \eta_{c,l} \frac{X_k}{\gamma_f}, \quad (4.3)$$

dove:

- X_k è il valore caratteristico del parametro di resistenza o di deformazione. Nel caso X_k rappresenti la resistenza a trazione f_{ftk0}, essa corrisponde al valore che individua la classe secondo quanto riportato in Tabella 3-3;

- γ_f è il fattore parziale delle barre di FRP, definito dalla (4.2) e per i quali si devono adottare i valori indicati nel § 4.5;

- η_T è il fattore di conversione che tiene conto degli effetti della temperatura, da valutarsi secondo quanto riportato nel § 4.6.1 in funzione delle condizioni di esposizione della struttura;

- η_a è il fattore di conversione ambientale che tiene conto della durabilità delle barre in funzione delle condizioni di esposizione ambientale, da valutarsi secondo quanto riportato nel § 4.6.1 in funzione delle condizioni di esposizione della struttura;

- $\eta_{c,l}$ è il fattore di conversione relativo ad effetti di fatica statica (*creep rupture*) in presenza di carichi di lunga durata, da valutarsi secondo quanto riportato nel § 4.6.2. .

(4) Nella (4.3), è consentito adottare $\eta_T = 1$, $\eta_a = 1$, $\eta_{c,l} = 1$ per qualunque condizione di esposizione per: 1) opere provvisionali con vita di progetto convenzionale (definita secondo la Normativa vigente) non superiore a 5 anni, 2) per le verifiche degli elementi strutturali durante le fasi costruttive dell'opera purché queste abbiano una durata inferiore a 2 anni.

4.5 FATTORI PARZIALI PER I MATERIALI

(1) Per le verifiche agli stati limite ultimi (SLU) nei riguardi di sollecitazioni che inducono tensioni normali, il valore da attribuire al fattore parziale delle barre di FRP, γ_f, è 1.25 per azioni permanenti e variabili e 1.10 per azioni eccezionali. Dettagli sulla procedura seguita per definire il valore del fattore parziale γ_f per azioni permanenti e variabili sono riportati nell'Appendice B.

(2) Per le verifiche agli stati limite ultimi (SLU) nei riguardi di sollecitazioni taglianti e nel caso della valutazione degli effetti di confinamento prodotti dalle staffe di FRP sul calcestruzzo in elementi presso-inflessi o soggetti a prevalenti sollecitazioni di sforzo normale, il valore da attribuire al fattore parziale delle staffe di FRP, γ_f, è 1.40 per azioni permanenti e variabili e 1.25 per azioni eccezionali. Dettagli sulla procedura seguita per definire il valore del fattore parziale γ_f sono riportati nell'Appendice B.

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

(4) 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.

4.6 PROBLEMI SPECIALI DI PROGETTO

4.6.1 Fattori di conversione per azioni ambientali e temperatura

(1) Le proprietà meccaniche (quali ad 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 diverse da quelle ordinarie, quali esposizione ad ambiente alcalino ed umidità (acqua e soluzioni saline), o in presenza di irraggiamento solare.

(2) Riguardo agli effetti da esposizione ad 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. I principali effetti dell'assorbimento di umidità (a causa di esposizione in acqua e/o in soluzioni saline) riguardano la resina e consistono in: plasticizzazione della resina, riduzione della temperatura di transizione vetrosa, riduzione di resistenza e riduzione (anche se meno pronunciata) di rigidezza. L'assorbimento di umidità dipende dal tipo di resina polimerica, dall'interfaccia matrice-fibra e dalla composizione e qualità delle barre.

(3) L'effetto complessivo dell'ambiente sulla resistenza delle barre di FRP è tenuto in conto attraverso il fattore di conversione ambientale η_a.

(4) L'effetto della temperatura sulla resistenza delle barre di FRP è tenuto in conto attraverso il fattore di conversione η_T. Gli effetti della temperatura possono essere significativi nel caso di elementi da ponte e vanno considerati in elementi direttamente esposti ad irraggiamento solare.

(5) La Tabella 4-1 indica, per barre in fibre di vetro (GFRP) e di carbonio (CFRP), i valori da attribuire al fattore di conversione ambientale η_a ed al fattore η_T da utilizzare nella (4.3) per diverse condizioni di esposizione dell'elemento in calcestruzzo armato con le barre di FRP. Le classi di esposizione riportate in Tabella 4-1 sono definite in (EN 1992-1-1, 2023). Si rileva che nella seconda colonna della Tabella 4-1, per completezza, è stata utilizzata la stessa nomenclatura delle classi di esposizione adottata per le strutture in calcestruzzo armate con barre di acciaio.

Tabella 4-1 – Valori dei fattori η_T e η_a per varie condizioni di esposizione della struttura

Condizione di esposizione	**Classe di esposizione***	**η_T**	**η_a**
1 (ambiente interno secco)	X0, XC1 secco	1.0	GFRP: 0.85 CFRP: 0.95
2 (ambiente esterno secco)	XS1	1.0: per elementi non direttamente esposti a irraggiamento solare 0.9: per elementi direttamente esposti a irraggiamento solare	GFRP: 0.85 CFRP: 0.95
3 (ambiente permanentemente o ciclicamente umido)	XC1 umido, XC2, XC3, XC4 XD1, XD2, XD3 XF1, XF2, XF3, XF4, XS2, XS3, XA1, XA2, XA3	1.0: per elementi non direttamente esposti a irraggiamento solare 0.9: per elementi direttamente esposti a irraggiamento solare	GFRP: 0.70 CFRP: 0.85

*Le classi di esposizione sono definite nella norma EN 1992-1-1 (2023). Ai fini di uniformità e completezza, si è mantenuta la stessa nomenclatura impiegata per le strutture in calcestruzzo armato con armature in acciaio.

4.6.2 Fattore di conversione per effetti di lunga durata $\eta_{c,l}$

(1) Gli effetti della fatica statica (*creep rupture)* nelle barre di FRP sotto tensioni prolungate nel tempo vanno tenuti in conto sia nelle verifiche tensionali allo SLE, limitando il valore della tensione nelle barre nella combinazione quasi-permanente delle azioni, sia nelle verifiche di resistenza allo SLU, considerando un valore ridotto della resistenza a trazione di progetto delle barre di FRP per effetto delle tensioni agenti nelle barre nella combinazione quasi-permanente delle azioni.

(2) Per le verifiche agli SLU, gli effetti di fatica statica (*creep rupture*) prodotti da carichi prolungati nel tempo sono tenuti in conto definendo il fattore di conversione per carichi di lunga durata $\eta_{c,l}$, riportato nella (4.3) e definito come segue:

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

dove

- $\sigma_{f,qp}$ è la tensione agente nella barra di FRP per effetto di carichi prolungati nel tempo, da intendersi come corrispondenti alla combinazione quasi-permanente delle azioni;
- $f_{ftk,c}$ è il valore caratteristico della resistenza a trazione della barra in FRP per fatica statica valutato ad un tempo corrispondente alla vita utile delle barre di FRP, assunta per convenzione pari a 100 anni, secondo quanto definito in *EAD-barre FRP*;
- $\eta_c = \frac{f_{ftk,c}}{f_{ftk0}}$ è il fattore di conversione per fatica statica (*creep rupture*) a 100 anni, essendo f_{ftk0} 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 (4.4) evidenzia che, nella combinazione di azioni allo SLU, ed in caso di stato tensionale prolungato nel tempo e di entità rilevante, per le barre di FRP deve essere considerata una resistenza a trazione ridotta rispetto alla resistenza f_{ftk0}. In particolare, il fattore di conversione $\eta_{c,l}$ è compreso tra η_c ed 1. Esso è in genere maggiore di η_c, in quanto coincide con esso solo se il livello di tensione $\sigma_{f,qp}$ è esattamente uguale alla resistenza per fatica statica $f_{ftk,c}$. A favore di sicurezza, è possibile assumere $\eta_{c,l} = \eta_c$ nelle verifiche nei riguardi delle combinazioni di carico allo SLU.

(3) L*'EAD-barre FRP* indica come ottenere sperimentalmente la resistenza a trazione per fatica statica $f_{ftk,c}$ da introdurre nella (4.4). In assenza di specifiche indicazioni sperimentali per $f_{ftk,c}$, si possono assumere per il fattore di conversione per fatica statica (*creep rupture)* a 100 anni, η_c, i valori riportati in Tabella 4-2 da utilizzare per il calcolo della resistenza $f_{ftk,c}$ ($f_{ftk,c} = \eta_c \cdot f_{ftk0}$).

Tabella 4-2 – Fattore di conversione per fatica statica (*creep rupture*) a 100 anni, η_c, per barre di FRP

Modalità di carico	**Tipo di fibra**	η_c
Quasi permanente	Vetro	0.50
	Carbonio	0.80

(4) Si noti che la (4.4) richiede che sia valutata la tensione di trazione agente nelle barre di FRP, $\sigma_{f,qp}$, corrispondente alla combinazione quasi-permanente delle azioni e responsabile della riduzione di resistenza delle barre 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.

(5) Nelle verifiche allo SLE relative alla limitazione delle tensioni nelle barre di FRP, al fine di ridurre gli effetti della fatica statica, la tensione di trazione nelle barre di FRP deve essere opportunamente limitata in funzione della resistenza per fatica statica, $f_{ftk,c}$, secondo quanto riportato al punto (1) del §7.2.

(6) Per quanto riguarda l'effetto di azioni cicliche che, per numero dei cicli e per ampiezza della variazione dello stato tensionale, possono provocare fenomeni di fatica nei materiali, le prestazioni delle barre di FRP sono generalmente molto buone. Tra le diverse tipologie, le barre di fibre di vetro risultano, tuttavia, le più suscettibili agli effetti dei carichi ciclici. In mancanza di dati sperimentali sulla resistenza a trazione per fatica delle barre di FRP (caratteristica meccanica $f_{fatigue}$ definita nell'E*AD-barre FRP* al §2.2.7 e nella *LG-barre FRP* in Tab. 3), le verifiche agli SLU di elementi

armati con barre di FRP sotto azioni cicliche che inducano fenomeni di fatica si possono eseguire utilizzando, a vantaggio di sicurezza, come resistenza a trazione delle barre di FRP il valore dato dalla (4.3) in cui il fattore η_c sostituisce il fattore $\eta_{c,l}$ ed adottando per esso i valori riportati in Tabella 4-2.

4.6.3 Comportamento delle barre di FRP sotto alte temperature

(1) La vulnerabilità dei polimeri organici alle alte temperature, essenzialmente dovute ad incendio 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 elasticità longitudinale a trazione), così come delle proprietà di adesione, inizia quando si raggiungono temperature prossime alla temperatura di transizione vetrosa della barra, T_g. Il valore di T_g per i prodotti forniti dai principali Fabbricanti di barre 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 delle barre di FRP con la temperatura dipende dal tipo di fibra e di resina, dal tipo di trattamento superficiale delle barre, dalla percentuale di resina 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, quali rivestimenti con materiali normali o isolanti speciali, o sistemi di protezione attiva) se il copriferro è adeguato. Inoltre, 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 armature 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 le azioni di progetto in condizioni di incendio al tempo *t* di esposizione al fuoco, $E_{fi,d,t}$, siano calcolate combinando le azioni meccaniche per situazioni di progetto eccezionale e che la capacità di progetto nelle medesime condizioni, $R_{fi,d,t}$, sia calcolata adottando un fattore parziale pari a $\gamma_c = 1.0$ per il calcestruzzo e $\gamma_f = 1.1$ per le barre di FRP.

(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 (EN 1992-1-2, 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 (EN 1992-1-2, 2023), mentre la presenza delle barre di FRP può essere trascurata nel modello termico a causa delle loro ridotte dimensioni.

(5) L'effetto delle alte temperature sulla resistenza e sulla rigidezza del calcestruzzo può essere valutato secondo indicazioni normative di comprovata validità (EN 1992-1-2, 2023). In Appendice F è riportata, a titolo di esempio, una procedura semplificata per la verifica a flessione di una sezione in calcestruzzo armata con barre di FRP in condizioni di incendio.

(6) In generale, le parti in calcestruzzo della sezione che superano i 500 °C non devono essere tenute in conto nel calcolo delle capacità resistenti a flessione e a taglio; per considerare il solo contributo efficace del calcestruzzo con temperature inferiori a 500 °C si riducono opportunamente i valori delle dimensioni della sezione in funzione del campo di temperature valutato nell'elemento strutturale mediante analisi termica.

Bibliografia essenziale

1. EN 1990:2023 (2023) *Eurocode 0 - Basis of structural and geotechnical design*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
2. EN 1992-1-1:2023 (2023) *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
3. EN 1992-1-2:2023 (2023) *Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-2: Structural fire design*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
4. EAD 260023-00-0301 (2024) *Carbon, glass, basalt and aramid Fibre Reinforced Polymer bars as reinforcement of structural elements.* Adopted January 2019, EOTA. OJ Publication: Decision (EU) 2024/1944.
5. 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 dell'elemento rinforzato 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 per deformazioni flessionali dell'elemento) attraverso alcuni coefficienti che tengono conto in maniera semplificata della qualità dell'aderenza.

(3) Il meccanismo di aderenza di barre inserite come armature all'interno di 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 in calcestruzzo (copriferro) e, in modo più contenuto, dalla posizione della barra rispetto alla direzione del getto. Nel caso specifico delle 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 (sabbiatura, presenza di scanalature o risalti superficiali ottenuti con differenti tecnologie di produzione). In funzione del tipo di trattamento superficiale, assumono importanza ai fini del meccanismo di aderenza 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 sabbiatura.

(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 potrebbe avere una diversa influenza sul meccanismo di aderenza rispetto al caso delle barre metalliche. 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 attiva 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 anche in assenza di evidenti risalti lungo la superfice, 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, quindi, 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 macrocategorie di barre:

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 alternati, 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 modificando non solo la forma delle barre, ma anche incrementando l'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). L'obiettivo di tale trattamento è l'aumento della rugosità della superficie, il miglioramento dell'ingranamento e l'incremento dell'area di contatto calcestruzzo-barra.

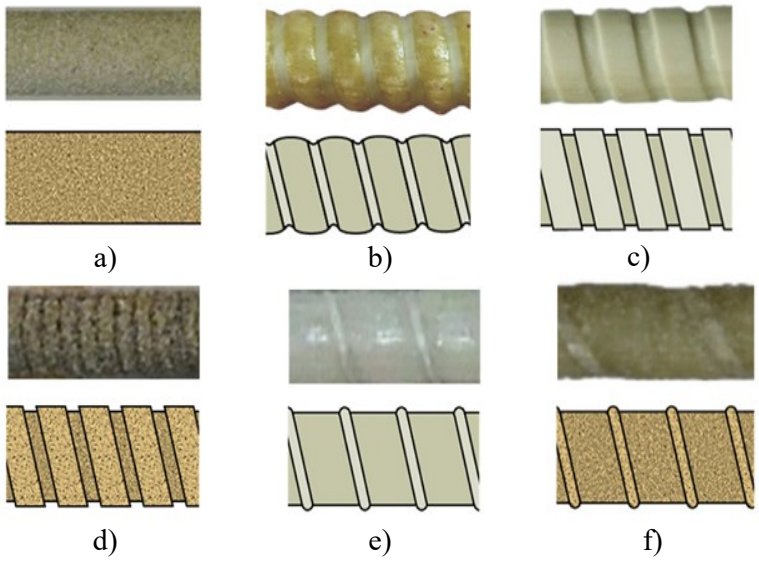


Figura 5-1 - Esempi dei più comuni trattamenti superficiali delle barre di FRP: a) barre sabbiate; b) barre nervate; c) barre dentellate; d) barre dentellate con sabbiatura; e) barre con avvolgimento a spirale; f) barre con avvolgimento a spirale e sabbiatura.

Si evidenzia che esistono anche barre senza alcun trattamento superficiale (barre lisce) per le quali l'entità ridotta 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 delle presenti Istruzioni se non si raggiunge la soglia minima di resistenza di aderenza, da valutarsi mediante prove sperimentali di estrazione da blocchi di calcestruzzo (si veda §5.3). E', pertanto, altamente consigliato utilizzare barre provviste di 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 di FRP-calcestruzzo. Tale legame può essere ottenuto per via sperimentale secondo quando indicato nel §5.3.

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

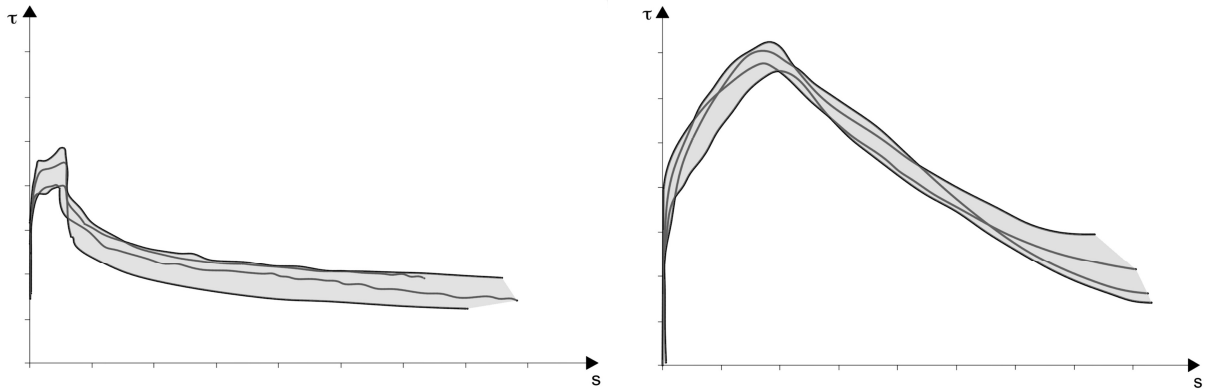
a) legame di aderenza basato principalmente sull'adesione chimico-fisica all'interfaccia barra-calcestruzzo;

b) legame di aderenza basato sia sull'adesione chimico-fisica sia sull'ingranamento meccanico ('*interlocking*') che si instaurano all'interfaccia barra-calcestruzzo, ma principalmente basato sull'ingranamento che dipende, in modo più o meno rilevante, dalla tipologia di trattamento superficiale della barra di FRP.

Nel caso di prevalenza del meccanismo di 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 o con valori molto piccoli di scorrimento fino al raggiungimento del valore di picco (resistenza di aderenza, τ_b). Superato il picco, la curva può mostrare un rapido decadimento delle tensioni di aderenza sino all'annullamento o al raggiungimento di un valore residuo che rimane costante all'aumentare degli scorrimenti barra-calcestruzzo e che è dovuto all'attrito tra lo spessore di calcestruzzo rimasto adeso alla barra, in genere molto esiguo, ed il calcestruzzo stesso.

Nel caso di prevalenza del meccanismo di ingranamento meccanico ('interlocking'), il legame di aderenza ha l'andamento tipico riportato in Figura 5-2b. In questo caso, il tratto lungo cui si realizza l'adesione chimica con scorrimenti nulli o molto ridotti 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 resistenza di aderenza, τ_b, che assume, però, valori più alti di quelli raggiunti nel caso del legame basato sulla sola adesione chimico-fisica, si evidenzia una fase discendente e lo sviluppo di un meccanismo tipicamente attritivo caratterizzato da una tensione tangenziale residua fino al completo sfilamento della barra e dello spessore di calcestruzzo rimasto adeso alla barra, in genere più rilevante rispetto al caso precedente, dal calcestruzzo circostante.

(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.



a) b)

Figura 5-2 – Esempi di legami di aderenza tensione tangenziale – scorrimento 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 estrazione (*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 τ-s). Poiché la tensione tangenziale di aderenza è in realtà variabile lungo la barra, la prova di pull-out per la qualificazione dell'aderenza deve essere condotta considerando una lunghezza aderente tra barra e calcestruzzo limitata, in modo che sia accettabile l'ipotesi di tensioni tangenziali costanti lungo la barra.

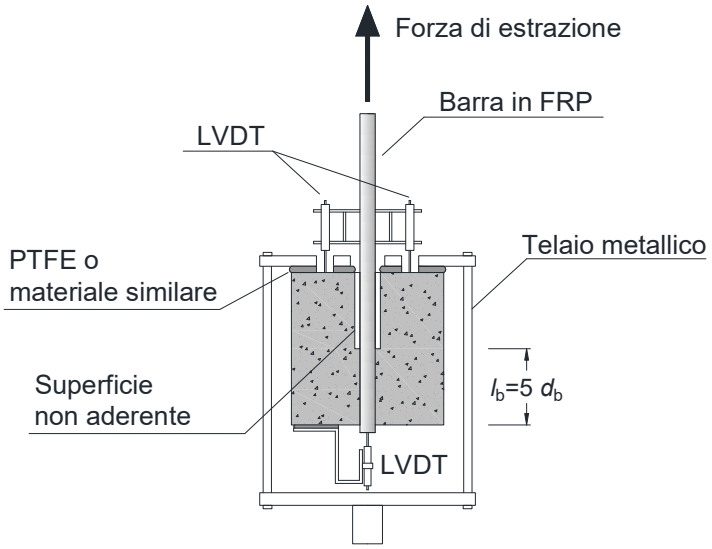


Figura 5-3 – Schema di una prova di estrazione (*pull-out*) per la caratterizzazione sperimentale del legame di aderenza di barre di FRP.

(2) La qualità dell'aderenza di barre di FRP deve essere valutata 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 ℓ_b pari a 5 volte il diametro effettivo della barra di FRP, $d_{b,eff}$, seguendo le indicazioni riportate nelle vigenti Normative internazionali e nazionali per la qualificazione (*EAD-barre FRP* o *LG-barre FRP*).

Assumendo una distribuzione costante delle tensioni tangenziali nella lunghezza aderente ℓ_b della barra, la resistenza di aderenza, τ_b, in ogni singola prova di *pull-out* si calcola in corrispondenza del carico massimo F_{max} ottenuto nella prova, come segue, purché la rottura sia avvenuta all'interfaccia barra di FRP-calcestruzzo:

$$\tau_b = \frac{F_{max}}{\pi d_{b,eff} \cdot \ell_b} \qquad \text{con } \ell_b = 5d_{b,eff} \tag{5.1}$$

Ai fini della qualificazione dell'aderenza, si deve considerare il valore medio della resistenza di aderenza ottenuto 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 di aderenza 1: $\tau_b > 15.0$ MPa

Classe di aderenza 2: $7.0 \text{ MPa} \le \tau_b \le 15.0$ MPa

Le indicazioni progettuali riportate nelle presenti Istruzioni non si intendono valide per barre di FRP per le quali le prove sperimentali abbiano evidenziato un valore medio della resistenza di aderenza $\tau_b < 7.0$ MPa.

5.4 LUNGHEZZA DI ANCORAGGIO

(1) Tipicamente per le barre metalliche la lunghezza di ancoraggio è calcolata in modo da essere sufficiente a garantire il raggiungimento della tensione di snervamento in una prova di estrazione della barra da un blocco di calcestruzzo. Al contrario, per le barre di FRP, tenendo conto della resistenza a trazione particolarmente elevata, spesso non è necessario che la lunghezza di ancoraggio sia tale da assicurare la 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 tipicamente le massime sollecitazioni flettenti sono proprio alle estremità degli elementi strutturali.

(2) Per barre rettilinee di FRP, indicata con σ_{fd} la tensione di trazione di progetto agente nelle barre sotto la combinazione di carichi allo SLU, la lunghezza di ancoraggio può essere calcolata con le seguenti espressioni ed in funzione della classe di aderenza definita nel §5.3:

- per barre di FRP in Classe di aderenza 1:

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

- per barre di FRP in Classe di aderenza 2:

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

in cui:
- il coefficiente k_{cp} tiene conto dell'effetto della posizione della barra di FRP durante il getto sul meccanismo di aderenza (si può assumere pari a 1.0 o 1.2 per buone o scarse condizioni di aderenza, rispettivamente, secondo quanto indicato in EN 1992-1-1, 2023);

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

Il termine $\left(\frac{1.5d_{\text{b}}}{c_{\text{d}}}\right)^{1/2}$ si considera nelle (5.2) solo se esso risulta > 1, altrimenti, a vantaggio di sicurezza per il calcolo di ℓ_{a}, si può trascurare. Gli esponenti ed il coefficiente k_{ℓ} che compaiono in tali espressioni sono stati ottenuti attraverso analisi statistiche e regressioni basate su confronti con numerosi risultati sperimentali.

(3) Se si vuole garantire che sia assicurato l'ancoraggio della barra di FRP soggetta ad un valore di tensione σ_{fd}, la lunghezza di ancoraggio, indicata dalle (5.2a) e (5.2b) 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 aderenza. Pertanto, la lunghezza di ancoraggio di progetto, ℓ_{ad}, è pari a:

$$\ell_{\text{ad}} = \max\left(\ell_{\text{a}}, 300\,\text{mm}, 20d_{\text{b}}\right) \tag{5.3a}$$

(4) In caso di condizione di esposizione 3 (si veda Tabella 4-1), nella (5.3a) la lunghezza di ancoraggio di progetto, ℓ_{ad}, va amplificata tenendo conto del fattore di conversione ambientale η_{a} riportato in Tabella 4-1, come segue:

$$\ell_{\text{ad}} = \frac{1}{\eta_{\text{a}}}\max\left(\ell_{\text{a}}, 300\,\text{mm}, 20d_{\text{b}}\right) \tag{5.3b}$$

(5) Nelle (5.2), ai fini della valutazione della tensione σ_{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.

(6) Qualora non sia possibile realizzare la lunghezza di ancoraggio di progetto ℓ_{ad} data dalle (5.3), è possibile realizzare l'ancoraggio delle barre rettilinee mediante sovrapposizione con barre di FRP di uguale diametro nominale e dotate all'estremità di una piegatura a 90° (Figura 5-4). La lunghezza di sovrapposizione della parte rettilinea della barra piegata aggiuntiva deve essere pari a:

$$\ell_{\text{s}} = 1.25 \cdot \ell_{\text{ad}} \tag{5.4}$$

Questa modalità di realizzazione dell'ancoraggio, particolarmente utilizzata per semplificare la distinta dei ferri di progetto ed il loro trasporto (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 avere una elevata congestione delle armature. La barra piegata aggiuntiva deve essere provvista, dopo la sagomatura a 90°, di una lunghezza L_t pari almeno a 10 volte il diametro nominale della barra, d_{b}: $L_t \geq 10d_{\text{b}}$ (Figura 5-4).

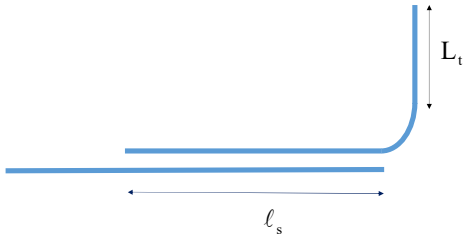


Figura 5-4 – Ancoraggio di barra di FRP mediante sovrapposizione con barra di FRP dotata di piegatura a 90°

(7) Le (5.2) possono essere utilizzate anche per calcolare, nelle sezioni che si trovano ad una distanza $\ell_b < \ell_{ad}$ dall'estremità della barra di FRP, la massima tensione di trazione di progetto che può essere applicata alla barra, σ_{fd}. L'inversione delle (5.2) fornisce, infatti, le seguenti espressioni:

- per barre di FRP in Classe di aderenza 1:

$$\sigma_{fd} = k \cdot \left(\frac{\ell_b}{d_b}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{25}\right)^{2/5} \cdot \left(\frac{20}{d_b}\right)^{1/5} \cdot \left(\frac{c_d}{1.5 d_b}\right)^{1/4} \le f_{ftd} \qquad k = 92 \qquad (5.5a)$$

- per barre di FRP in Classe di aderenza 2:

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

Il termine funzione di $\left(\frac{c_d}{1.5 d_b}\right)$ si considera nelle (5.5) solo se risulta < 1, altrimenti, a vantaggio di sicurezza per il calcolo di σ_{fd}, si può trascurare.

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 tale che il momento resistente di progetto M_{Rd} sia superiore al momento sollecitante di progetto, M_{Ed}, derivante dalle azioni di progetto agenti sull'elemento strutturale:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \tag{6.1}$$

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, N_{Ed}.

(2) Le ipotesi fondamentali su cui si basa il calcolo del momento resistente di progetto M_{Rd} allo stato limite ultimo di una 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 a trazione nulla del calcestruzzo;
- trascurabilità del contributo delle barre di FRP soggette a tensioni di compressione;
- legame costitutivo e valore della deformazione ultima a compressione, ε_{cu}, del calcestruzzo conformi 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, ε_{cu} (rottura lato calcestruzzo);
- raggiungimento della deformazione ultima a trazione nelle barre di FRP, ε_{fd}, (rottura lato barre di FRP) calcolata in funzione della resistenza a trazione di progetto, come segue:

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

dove E_f è il valore medio del modulo elastico longitudinale delle barre di FRP, f_{fk0} è la resistenza caratteristica a trazione delle barre di FRP, γ_f è il fattore parziale relativo alle barre di FRP definito nel § 4.4.3 e pari a 1.25 per le verifiche flessionali secondo quanto indicato nel §4.5, e η_T, η_a e $\eta_{c,l}$ sono i fattori di conversione i cui valori sono definiti nel §4.6.1 e nel §4.6.2 in funzione delle condizioni di esposizione. Nella (6.2) le barre di FRP 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 valore medio del modulo elastico delle barre di FRP in direzione longitudinale, E_f.

(3) Nel caso in cui la rottura della sezione si manifesti per raggiungimento della deformazione ultima nel calcestruzzo compresso, ε_{cu}, è possibile avvalersi per quest'ultimo di una distribuzione semplificata costante delle tensioni normali di compressione del tipo "*stress-block*", in analogia a quanto si fa per elementi armati con barre metalliche.

(4) Nel caso di flessione semplice, con riferimento alla sezione rettangolare soggetta a momento positivo riportata in Figura 6-1, si possono distinguere due 'campi' in cui può trovarsi la retta che rappresenta l'andamento delle deformazioni nella sezione in condizioni di rottura: 1) campo 1, se si raggiunge la deformazione ultima dell'armatura di FRP tesa ε_{ftd}, e 2) campo 2 se si raggiunge la deformazione ultima del calcestruzzo compresso ε_{cu} con armatura in FRP in campo elastico. Nella Figura 6-1, A_f è l'area complessiva di barre in FRP in zona tesa, h e b sono altezza e base della sezione rettangolare, c è la distanza del baricentro delle barre di FRP dal bordo teso della sezione (copriferro meccanico), per cui $d = h\text{-}c$ è l'altezza utile, e x è la distanza dell'asse neutro dal bordo compresso della sezione. Nella Figura 6-1, è indicata la posizione dell'asse neutro x per una retta delle deformazioni corrispondente ad una rottura in campo 1. I due campi sono chiaramente separati dalla retta che congiunge i valori della deformazione ultima nei due materiali, ε_{cu} e ε_{ftd}.

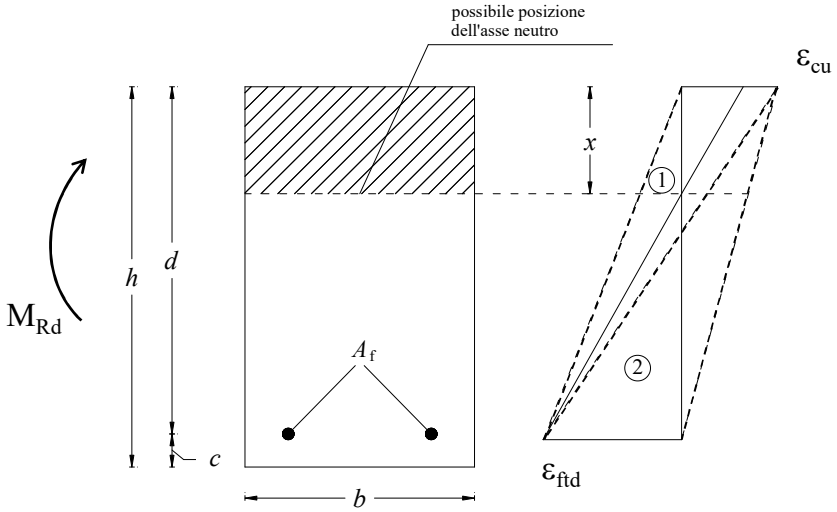


Figura 6-1 - Modalità di rottura di una sezione di calcestruzzo armata con barre di FRP soggetta a flessione.

(5) Poiché nel campo 1 la rottura si verifica per raggiungimento della deformazione ultima nelle barre di FRP, ε_{ftd}, un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione nelle barre, ε_{ftd}. 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, quindi, essere calcolate sulla base della linearità del diagramma per il tramite delle seguenti relazioni:

- deformazione nel calcestruzzo al lembo compresso: $$\varepsilon_c = \varepsilon_{ftd} \cdot \frac{x}{(d-x)} \le \varepsilon_{cu} \qquad (6.3)$$

- deformazione nella fibra baricentrica delle barre di FRP: $$\varepsilon_f = \varepsilon_{ftd} \qquad (6.4)$$

dove i simboli assumono il significato già introdotto in precedenza.
La deformazione ultima nelle barre di FRP, ε_{ftd}, è definita dalla (6.2) se la sezione in cui si effettua la verifica si trova ad una distanza dall'estremità delle barre maggiore o uguale della lunghezza ancoraggio di progetto definita dalle (5.3) assumendo $\sigma_{fd} = f_{ftd} = \varepsilon_{ftd} \cdot E_f$ oppure se sono previste barre piegate a 90° in sovrapposizione per garantire un idoneo ancoraggio (si veda Figura 5-4). In caso

contrario (distanza della sezione di verifica dall'estremità delle barre minore della lunghezza di ancoraggio data dalla (5.3)), la deformazione ultima per la barra può essere calcolata come $\varepsilon_{ftd}=\frac{\sigma_{fd}}{E_f}<f_{ftd}$, essendo σ_{fd} data dalle (5.5) in funzione della distanza ℓ_b della sezione di verifica dall'estremità della barra di FRP.

(6) Nel campo 2, la rottura avviene per raggiungimento della deformazione ultima del calcestruzzo, ε_{cu}, mentre la deformazione nelle barre di FRP è inferiore alla deformazione ultima ε_{ftd}: in tal caso, fissata la deformazione del calcestruzzo compresso pari a ε_{cu}, le deformazioni nella sezione possono essere calcolate sulla base delle linearità del diagramma delle deformazioni, come segue:

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

- deformazione nella fibra baricentrica delle barre di FRP: $\varepsilon_f = \varepsilon_{cu}\cdot\frac{d-x}{x} \le \varepsilon_{ftd}$ (6.6)

dove i simboli assumono il significato già introdotto in precedenza.
Per la valutazione di ε_{ftd} valgono le stesse considerazioni riportate al punto (5).

(7) In caso di flessione semplice, per entrambe le tipologie di rottura (campo 1 e campo 2), la distanza dell'asse neutro, *x*, dal lembo compresso della sezione è determinata per mezzo dell'equazione di equilibrio alla traslazione,:

$$\psi\cdot b\cdot x\cdot f_{cd} - A_f\cdot E_f\cdot\varepsilon_f = 0 \tag{6.7}$$

In caso di sollecitazione di presso--flessione, il primo membro della (6.7) non sarà uguale a 0, ma dovrà uguagliare lo sforzo normale sollecitante di progetto, N_{Ed}, e saranno possibili ulteriori campi di rottura oltre a quelli individuati in Figura 6-1 per la flessione semplice. In caso di pressoflessione, inoltre, si potrà costruire anche il dominio di interazione M_{Rd} - N_{Rd}, utilizzando la (6.7) e la (6.9) introdotta nel seguito.
Nella (6.7), f_{cd} è il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo da valutarsi secondo le indicazioni della Normativa vigente, i parametri geometrici e meccanici hanno lo stesso significato già introdotto in precedenza, ψ è un coefficiente adimensionale pari a 0.8095 in caso di campo di rottura 2, mentre in caso di campo di rottura 1 è espresso dalle seguenti relazioni in funzione della deformazione raggiunta nel calcestruzzo ε_c, indicando per semplicità di scrittura $\overline{\varepsilon_c} = 1000\varepsilon_c$:

$$\psi = \begin{cases} \overline{\varepsilon_c}\left(0.5-\frac{\overline{\varepsilon_c}}{12}\right) & \text{per } \overline{\varepsilon_c} \le 2.0 \\ 1-\frac{2}{3\overline{\varepsilon_c}} & \text{per } 2.0 \le \overline{\varepsilon_c} \le 3.5 \end{cases} \tag{6.8}$$

In caso di campo di rottura 1, la (6.7) può essere risolta iterativamente, essendo il coefficiente ψ funzione della deformazione al lembo compresso del calcestruzzo $\varepsilon_c < \varepsilon_{cu}$.
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'*.
Una volta nota la posizione dell'asse neutro, *x*, il momento resistente, M_{Rd}, può essere, infine, ricavato dall'equazione di equilibrio alla rotazione rispetto al baricentro geometrico della sezione in calcestruzzo, come segue:

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

Nella (6.9), il coefficiente adimensionale $\lambda = 0.4160$ in caso di campo di rottura 2, mentre in caso di campo di rottura 1 è espresso dalle seguenti relazioni in funzione della deformazione raggiunta nel calcestruzzo, $\overline{\varepsilon_c}$:

$$\lambda = \begin{cases} \dfrac{8 - \overline{\varepsilon_c}}{4\left(6 - \overline{\varepsilon_c}\right)} & \text{per } \overline{\varepsilon_c} \le 2.0 \\ \dfrac{\varepsilon_c\left(3\overline{\varepsilon_c} - 4\right) + 2}{2\overline{\varepsilon_c}\left(3\overline{\varepsilon_c} - 2\right)} & \text{per } 2.0 \le \overline{\varepsilon_c} \le 3.5 \end{cases} \tag{6.10}$$

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 che compone la 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 Fabbricante 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 delle deformazioni (mediante tecniche fotogrammetriche ormai consolidate e 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 aumentando lo spessore del 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 (EN 1992-1-2) 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 in caso di sollecitazioni flessionali è legato all'incapacità della barra di assorbire trazione. Questo meccanismo, molto penalizzante, può essere scongiurato se almeno le zone di estremità della barra sono in grado di garantire un sufficiente ancoraggio. In questa condizione, il meccanismo di collasso da verificare è legato al raggiungimento della resistenza a trazione di progetto della barra di FRP 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 (5.3). 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;

- l'uso di barre sovrapposte nella zona esposta al fuoco può portare ad un cedimento prematuro dell'elemento in calcestruzzo, in quanto il deterioramento della resistenza di aderenza nella zona esposta al fuoco può verificarsi prima della diminuzione della resistenza a trazione delle barre di FRP. 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 presenta un metodo semplificato di progettazione o verifica sotto azione di incendio.

6.3 VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ RESISTENTE A TAGLIO

(1) Le verifiche a taglio di elementi di calcestruzzo armati con barre di FRP si eseguono esclusivamente nei confronti degli stati limite ultimi, distinguendo il caso di elementi privi di armature trasversali resistenti a taglio ed il caso di elementi provvisti di armature trasversali resistenti a taglio e realizzate con staffe di FRP.

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 relazioni tarate su base empirica che tengono conto dei vari meccanismi resistenti che si mobilitano nelle travi di calcestruzzo. Si propongono nel seguito due formulazioni, una basata sull'espressione fornita dalla Normativa vigente nazionale per elementi con armatura longitudinale di acciaio (Approccio 1) e l'altra (Approccio 2) basata sulle espressioni fornite dall'Eurocodice 2 (EN 1992-1-1:2023) per elementi con armatura longitudinale sia di acciaio sia di FRP.

Approccio 1: la resistenza a taglio di elementi armati longitudinalmente con barre di FRP e privi di armatura trasversale è data da:

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

dove $V_{Rd,ct,min}$ rappresenta il valore minimo della resistenza a taglio offerta dai meccanismi resistenti del calcestruzzo, da calcolarsi come:

$$V_{Rd,ct,min} = 0.035 \cdot k^{3/2} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot d \tag{6.11b}$$

La (6.11a), così come la successiva (6.11c), è dedotta sulla base di una formulazione alternativa alla (4.1) che vede il fattore parziale di modello $\gamma_V = 1.5$ applicato all'intera formula che esprime la capacità $V_{Rd,ct}$ e non alle proprietà del materiale, che per questo motivo sono rappresentate nella (6.11a) e nella (&.11c) dal valore caratteristico f_{ck} e non da quello di progetto. Inoltre, nelle (6.11) i simboli utilizzati hanno il seguente significato:

- k_s è un coefficiente calibrato su base sperimentale, pari a 0.20 per armature longitudinali costituite da barre di FRP sia in fibra di vetro sia di carbonio;

- b_w e d sono la larghezza e l'altezza utile della sezione; in caso di sezione non rettangolare, b_w è la minima larghezza della sezione;
- $\rho_l = A_f/(b \cdot d) \le 0.02$ è il rapporto geometrico di armatura longitudinale tesa di FRP, A_f, adeguatamente ancorata, cioè che si estende per non meno di ($\ell_{ad} + d$) oltre la sezione considerata, dove ℓ_{ad} è la lunghezza di ancoraggio delle barre di FRP definita dalle (5.3);
- f_{ck} è la resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo;
- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \le 2$;
- E_f è il modulo elastico delle armature longitudinale di FRP, espresso in GPa.

Approccio 2: la resistenza a taglio di elementi armati longitudinalmente con barre di FRP e privi di armatura trasversale è data da:

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

in cui oltre ai simboli già introdotti, si ha:

- $\gamma_V = 1.4$, è il fattore parziale per il modello resistente a taglio in assenza di armature trasversali introdotto in (EN 1992-1-1:2023),
- k'_s è un coefficiente calibrato su base sperimentale, pari a 0.82 per armature longitudinali costituite da barre di FRP sia in fibra di vetro sia di carbonio,
- d_{dg} è un fattore di scala che dipende dal calcestruzzo e dalle dimensioni degli aggregati che lo compongono e può essere assunto pari a:

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

  $d_{dg} = 16 \text{ mm} + D_{min} \left(\frac{60}{f_{ck}} \right)^2 \le 40$ mm per calcestruzzi con f_{ck} > 60 MPa;

essendo D_{min} il più piccolo diametro del vaglio più grande che può essere sostituito dal diametro massimo degli inerti, D_{max}.

Nella (6.11c), il valore minimo della resistenza a taglio offerta dai meccanismi resistenti del calcestruzzo, $V_{Rd,ct,min}$, si calcola sempre con la (6.11b).

6.3.2 Elementi con armature trasversali di FRP resistenti a taglio

(1) Con riferimento ad elementi di calcestruzzo provvisti di armature trasversali resistenti a taglio interamente costituite da staffe di FRP oppure ibride, costituite cioè da staffe di acciaio e staffe di FRP, le indicazioni progettuali fornite nelle presenti Istruzioni si applicano solo al caso di armature trasversali (staffe di FRP o di FRP e di acciaio) disposte perpendicolarmente all'asse dell'elemento.

(2) 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 θ. Tale assunzione comporta che la resistenza di progetto a taglio dell'elemento, V_{Rd}, sia esprimibile come:

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

dove:

- $V_{Rd,c}$ è la resistenza a taglio di progetto associata alla crisi delle bielle compresse di calcestruzzo (meccanismo di crisi del traliccio per taglio-compressione),
- $V_{Rd,f}$ è il contributo legato al meccanismo di crisi del traliccio per taglio-trazione che dipende dalla resistenza a trazione delle staffe di FRP;
- $V_{Rd,ct}$ è il contributo legato al meccanismo di crisi del traliccio per taglio-trazione che dipende dalle resistenze che si attivano nell'elemento anche in assenza di armature trasversali.

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

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

In assenza di specifiche indicazioni ed in considerazione del limitato numero di dati sperimentali disponibili, si raccomanda di assumere $\theta = 45°$ ($\cot\theta = 1$).
Nella (6.13), A_{fw} è l'area dell'armatura a taglio di FRP posta lungo l'elemento con passo s e f_{ubd} è la resistenza a trazione di progetto della parte piegata delle staffe di FRP, da calcolarsi come segue:

$$f_{ubd} = \eta_a \cdot \eta_T \cdot \frac{f_{ubk}}{\gamma_f} \tag{6.14}$$

dove η_T e η_a sono i coefficienti di conversione che tengono conto degli effetti della temperatura e delle condizioni ambientali, come definiti nel §4.6, f_{ubk} è la resistenza caratteristica della parte piegata della staffa di FRP, e γ_f è il fattore parziale di sicurezza delle staffe di FRP da assumersi pari a 1.40 come specificato nel §4.5 per le verifiche allo SLU per sollecitazioni taglianti e avente lo stesso significato del fattore parziale γ_V introdotto in precedenza per calcolare il contributo $V_{Rd,ct}$.
Si sottolinea che nelle presenti Istruzioni, la resistenza f_{ubk} è una delle caratteristiche obbligatorie per la qualificazione delle staffe in FRP (Tabella 3-1) e deve risultare maggiore del 40% della resistenza caratteristica a trazione della parte rettilinea della staffa, $f_{ftk,st}$. Entrambe le resistenze, f_{ubk} e $f_{ftk,st}$, devono essere ottenute sulla base della qualificazione eseguita dal Fabbricante secondo *EAD-barre FRP* o *LG-barre FRP*; in particolare, il valore $f_{ftk,st}$ determina la classe di resistenza della barra con cui è stata realizzata staffa sulla base di quanto indicato in Tabella 3-3 (si veda punto (4) del §3.3). Se il processo produttivo della barra con cui è realizzata la staffa è lo stesso della barra rettilinea di pari diametro, la classe di resistenza è quella della barra rettilinea di pari diametro, individuata dalla sua resistenza caratteristica a trazione, f_{ftk0} e la resistenza f_{ubk} della parte piegata deve risultare maggiore del 40% di f_{ftk0}.
In fase di progetto, qualora la resistenza f_{ubk} non sia nota, nella (6.14) si potrà utilizzare il 40% della resistenza caratteristica associata alla classe scelta per la barra con cui verrà realizzata la staffa.
In caso di progettazione di elementi per azioni sismiche, la (6.14) ha la seguente limitazione: $f_{ubd} \le 0.005 \cdot E_f$.

(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 delle bielle compresse di calcestruzzo, $V_{Rd,c}$, è data dalla seguente espressione:

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

dove, per la determinazione di θ, vale quanto detto al punto (3).
Nella (6.15), ν è un coefficiente riduttivo da assumersi pari a 0.5 e α_c è un coefficiente che tiene conto dell'effetto benefico della compressione nella sezione ed è funzione della tensione media di

compressione agente nell'elemento, $\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c}$, essendo N_{Ed} lo sforzo normale sollecitante di progetto ed A_c l'area della sezione trasversale dell'elemento, come segue:

$$\begin{aligned}
&\alpha_c = 1 && \text{per } \sigma_{cp} = 0 \\
&\alpha_c = 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} && \text{per } 0 \le \sigma_{cp} \le 0.25\, f_{cd} \\
&\alpha_c = 1.25 && \text{per } 0.25\, f_{cd} \le \sigma_{cp} \le 0.50\, f_{cd} \\
&\alpha_c = 2.5\left(1 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) && \text{per } 0.50\, f_{cd} \le \sigma_{cp} \le f_{cd}
\end{aligned} \tag{6.16}$$

in cui f_{cd} è la resistenza a compressione di progetto del calcestruzzo.

(6) Le armature longitudinali devono essere dimensionate considerando la traslazione orizzontale del diagramma del momento sollecitante della quantità:

$$a_1 = \frac{0.9d \cdot \cot\theta}{2} \tag{6.17}$$

in cui per la determinazione di θ vale quanto detto al punto (3).

6.3.3 Progetto a taglio sotto azioni da incendio

(1) Per le verifiche in condizioni di incendio, il contributo a taglio delle armature di FRP, sia quelle longitudinali sia quelle trasversali, va trascurato quando la valutazione delle temperature nell'elemento strutturale indica il superamento del valore della T_g; ciò significa che, in tale evenienza, la resistenza a taglio dell'elemento è data dalla (6.11b) sia in presenza che in assenza di armatura a taglio, in quanto si trascura il contributo resistente dovuto all'effetto spinotto delle armature longitudinali.

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_{ftd};
- la tensione di snervamento delle staffe in acciaio è sostituita dalla resistenza di progetto a trazione della parte piegata delle staffe di FRP, f_{ubd}, dovendo essere $f_{ubd} \le 0.005 \cdot E_f$ 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 che risultano ancora più significativi rispetto a quelli osservati nelle barre di acciaio, per effetto dei minori valori dei moduli elastici delle barre di FRP. Pertanto, sebbene siano necessarie ancora ulteriori ricerche per confermare i dati sperimentali, il con-

tributo delle barre di FRP in zona compressa deve essere trascurato. Tuttavia, è necessario prevenire l'instabilità delle barre di FRP compresse, in quanto potrebbe inficiare il comportamento dell'intera sezione, prevedendo un adeguato confinamento. Il confinamento di barre di FRP soggette a compressione può essere realizzato tramite staffe di FRP, disposte perpendicolarmente all'asse dell'elemento e con un passo s che rispetti la seguente limitazione:

$$s \le \min\left(d_{\min}, 16d_{\mathrm{b}}, 48d_{\mathrm{bs}}\right) \tag{6.18}$$

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

(2) Oltre ad evitare l'instabilità delle barre compresse di FRP, un adeguato confinamento con staffe di FRP 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.

In particolare, per valutare tali effetti, in mancanza di formulazioni specifiche, è possibile utilizzare formule di comprovata validità o fornite dalla Normativa vigente relative ad elementi in calcestruzzo 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 resistenza di progetto f_{ubd} data dalla seguente espressione:

$$f_{\mathrm{ubd}} = \min\left(\eta_{\mathrm{T}} \cdot \eta_{\mathrm{a}} \frac{f_{\mathrm{ubk}}}{\gamma_{\mathrm{f}}}; 0.004 \cdot \mathrm{E}_{\mathrm{f}}\right) \tag{6.19}$$

essendo γ_{f} il fattore parziale di sicurezza delle barre di FRP da assumersi pari a 1.40, come specificato nel §4.5, η_{T} e η_{a} i coefficienti di conversione che tengono conto di effetti della temperatura e delle condizioni ambientali in funzione delle condizioni di esposizione, come definiti nel §4.7, f_{ubk} la resistenza caratteristica della staffa di FRP relativa alla parte piegata, E_{f} il valore medio del modulo elastico della staffa di FRP. Nella (6.19), il primo termine è correlato al comportamento elastico lineare delle staffe di FRP che fornisce una pressione di confinamento crescente con la sollecitazione assiale: all'aumentare della deformazione assiale del calcestruzzo, la tensione di confinamento continua, infatti, ad aumentare con l'espansione del calcestruzzo fino alla rottura a trazione delle staffe di FRP. Il secondo termine, invece, tiene conto del fatto che il livello di tensione nelle staffe di FRP deve essere, tuttavia, limitato per mantenere l'integrità del calcestruzzo.

6.6 VALUTAZIONE DELLA CAPACITA' RESISTENTE IN PRESENZA DI ARMATURE IBRIDE

6.6.1 Capacità resistente a flessione e pressoflessione

(1) Si ipotizza che la rottura per flessione o in caso di presso-flessione si manifesti quando si verifica una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della deformazione ultima nel calcestruzzo compresso, $\varepsilon_{\mathrm{cu}}$;
- raggiungimento della deformazione ultima a trazione nelle barre di FRP, $\varepsilon_{\mathrm{ftd}}$, 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.

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

(4) Con riferimento alla sezione rettangolare riportata in Figura 6-2, A_f è l'area complessiva e E_f il 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. Si possono definire tre campi in cui può collocarsi la retta che rappresenta l'andamento delle deformazioni nella sezione in condizioni di rottura:
- campo 1: si raggiunge la deformazione ultima a trazione nelle barre di FRP, ε_{ftd}, con il superamento della deformazione di snervamento nelle barre tese in acciaio, ε_{yd};
- campo 2a: si raggiunge la deformazione ultima nel calcestruzzo compresso, ε_{cu}, con il superamento della deformazione di snervamento nelle barre tese in acciaio, ε_{yd};
- campo 2b: si raggiunge la deformazione ultima nel calcestruzzo compresso, ε_{cu}, con le barre tese in acciaio in campo elastico ($\varepsilon_s < \varepsilon_{yd}$).

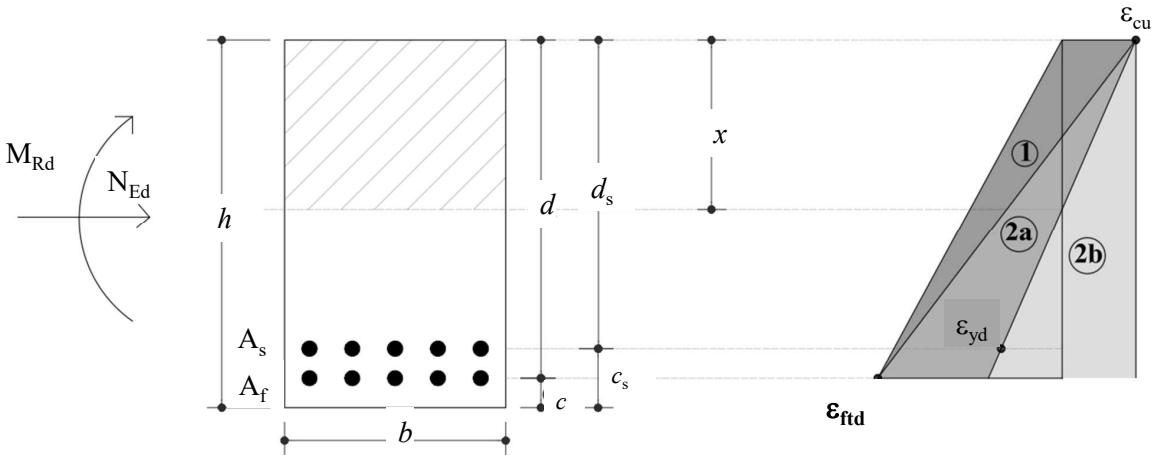


Figura 6-2 - Modalità di rottura a flessione semplice o a pressoflessione di una sezione di calcestruzzo armato con armature ibride acciaio-FRP.

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

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

- deformazione nel calcestruzzo compresso: $\varepsilon_c = \dfrac{x}{d-x}\varepsilon_{ftd}$ (6.20)
- deformazione nelle barre tese di acciaio: $\varepsilon_s = \dfrac{d_s - x}{d-x}\varepsilon_{ftd}$ (6.21)

dove d è la distanza dal lembo compresso del baricentro delle armature di FRP e d_s la distanza dal lembo compresso del baricentro delle armature di acciaio.
In tale campo di rottura, la tensione nell'armatura tesa di acciaio è pari alla tensione di snervamento di progetto f_{yd}.

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

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

- deformazione nelle barre tese di FRP: $\varepsilon_f = \frac{d-x}{x}\varepsilon_{cu}$ (6.22)
- deformazione nelle barre tese di acciaio: $\varepsilon_s = \frac{d_s-x}{x}\varepsilon_{cu}$ (6.23)

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

(7) Nel campo 2b, la rottura avviene sempre per raggiungimento della deformazione ultima del calcestruzzo compresso, mentre le barre di FRP non raggiungono la loro deformazione ultima a trazione e le barre tese in acciaio risultano in campo elastico: $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$, $\varepsilon_f < \varepsilon_{ftd}$, $\varepsilon_s < \varepsilon_{yd}$.

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

- deformazione nelle barre tese di FRP: $\varepsilon_f = \frac{d-x}{x}\varepsilon_{cu}$ (6.24)
- deformazione nelle barre tese di acciaio: $\varepsilon_s = \frac{d_s-x}{x}\varepsilon_{cu}$ (6.25)

In tale campo di rottura, la tensione nell'armatura tesa di acciaio si può calcolare moltiplicando la deformazione data dalla (6.25) per il modulo elastico dell'acciaio, E_s.

(8) In caso di flessione semplice, per tutte le tipologie di rottura (campo 1, campo 2a e campo 2b), la distanza dell'asse neutro, x, dal lembo compresso è determinata per mezzo dell'equazione di equilibrio alla traslazione:

$$\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} - A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f - A_s \cdot \sigma_s = 0 \tag{6.26}$$

In caso di presenza di sforzo normale, il primo termine della (6.26) non sarà pari a 0, ma al valore dello lo sforzo normale sollecitante di progetto, N_{Ed}.

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

$$M_{Rd} = \psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (0.5h - \lambda \cdot x) + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot (0.5h - c) + A_s \cdot \sigma_s \cdot (0.5h - c_s) \tag{6.27}$$

Per i coefficienti ψ e λ vale quanto già riportato nel §6.1.2 per gli elementi con sole armature di FRP.

Nelle (6.26) e (6.27), σ_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 ε_s è da valutarsi con la (6.25).

6.6.2 Capacità resistente a taglio

(1) Per gli elementi dotati di armatura trasversale a taglio ibrida, costituita cioè da un doppio registro di staffe (staffe interne di acciaio e staffe più esterne di FRP), in mancanza di dati sperimentali e di analisi numeriche in grado di chiarire con precisione la capacità resistente di questa configurazione, si suggerisce a favore di sicurezza di considerare solo l'apporto delle staffe di acciaio o di

quelle di FRP. La resistenza a taglio allo SLU può essere, quindi, determinata in accordo alla (6.12), in cui $V_{Rd,f}$ tiene conto del contributo di una sola delle due tipologie di staffe presenti, mentre $V_{Rd,ct}$ è dato dalla (6.11a) o dalla (6.11c). La resistenza delle bielle compresse di calcestruzzo, $V_{Rd,c}$, può essere calcolata tramite la (6.15).

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 rigidezza delle sezioni, per il tramite dei diagrammi momento-curvatura delle stesse. Le barre di FRP hanno un comportamento elasto-fragile e, pertanto, se si trascura il contributo di rigidezza del calcestruzzo teso, il diagramma momento-curvatura di una sezione in calcestruzzo armata con barre di FRP è monotono crescente e non si discosta significativamente da un andamento lineare fino a rottura. Di conseguenza, elementi strutturali armati con barre di FRP hanno scarsa duttilità (limitata al solo comportamento non lineare del calcestruzzo), che non permette fenomeni di ridistribuzione delle tensioni. 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 Indicazioni sul copriferro

(1) I valori elevati delle dilatazioni termiche trasversali delle barre di FRP rispetto a quelle del 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). Tali fessure 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.

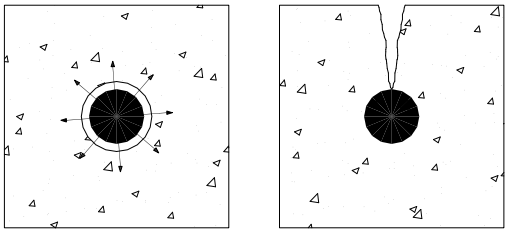


Figura 6-3 - Fessurazione indotta dall'espansione trasversale della barra di FRP e dalle conseguenti tensioni normali nel calcestruzzo nell'intorno della barra.

(2) Per evitare la formazione di fessure in direzione radiale alle barre, occorre adottare un idoneo valore del copriferro geometrico c_{geom} (distanza del bordo esterno delle barre longitudinali di FRP dal bordo della sezione) valutato come segue:

$$c_{\text{geom}} \geq c_{\text{min,b}} + \Delta c_{\text{dev}} \tag{6.28}$$

in cui Δc_{dev} è l'incremento di copriferro legato alla tolleranza di esecuzione, definito in accordo con l'Eurocodice 2 (Tabella 6.7, EN 1992-1-1, 2023) e $c_{\text{min,b}}$ è un valore minimo da garantire legato alle tensioni tangenziali di aderenza trasmesse dalle barre al calcestruzzo circostante e per il quale valgono le seguenti limitazioni: $1.5d_{\text{b}} \leq c_{\text{min,b}} \leq 50\text{mm}$, essendo d_{b} il diametro nominale della barra di FRP.

In presenza di staffe di FRP, il copriferro geometrico c_{geom} è la distanza del bordo delle staffe dal bordo della sezione e deve essere calcolato sempre secondo la (6.28), ma prevedendo le seguenti limitazioni per $c_{\text{min,b}}$: $\min(1.5d_{\text{b}};10\text{mm}) \leq c_{\text{min,b}} \leq 38\text{mm}$.

Si evidenzia che, per elementi armati con barre di FRP, nel calcolo del valore minimo del copriferro geometrico secondo la (6.28) non è presente il termine legato alla durabilità, che per barre metalliche dipende dalle condizioni di esposizione e dalla vita di progetto dell'opera.

6.8.2 Indicazioni sulle armature longitudinali

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

(2) L'area complessiva delle barre longitudinali di FRP in zona tesa, A_{f}, non deve essere inferiore ad un valore minimo, $\text{A}_{\text{f,min}}$, in grado di garantire soddisfacimento della seguente condizione:

$$\text{M}_{\text{Rd}} \geq 1.5 \cdot \text{M}_{\text{cr}} \tag{6.29}$$

dove M_{cr} rappresenta il momento di prima fessurazione della sezione, da determinarsi in accordo con la Normativa vigente. La (6.29) può essere riscritta in maniera equivalente come segue, essendo f_{ctm} la resistenza media a trazione del calcestruzzo e f_{ftd} la resistenza di progetto a trazione della barra di FRP:

$$\text{A}_{\text{f,min}} = 0.34 \cdot \frac{b \cdot d \cdot f_{\text{ctm}}}{f_{\text{ftd}}} \tag{6.30}$$

(3) L'area complessiva delle barre longitudinali di FRP in zona compressa, A_{fc}, non deve essere inferiore al seguente valore minimo:

$$\text{A}_{\text{fc,min}} = 0.001 \cdot \text{A}_{\text{c}} \tag{6.31}$$

(4) Per elementi non armati a taglio, l'area complessiva delle barre longitudinali di FRP in zona tesa, A_{f}, deve essere tale che la corrispondente percentuale geometrica ρ_{l} non sia inferiore al seguente valore minimo:

$$\rho_{\text{l,min}} = \frac{\text{A}_{\text{f,min}}}{b \cdot d} = 0.01 \tag{6.32}$$

(5) La sovrapposizione delle barre di FRP soggette a trazione deve essere realizzata nelle zone dell'elemento dove la tensione di trazione nelle barre nella combinazione di carichi allo SLU è minore dell'80% della resistenza di progetto delle barre, f_{ftd}. La lunghezza minima di sovrapposizione, ℓ_{s}, deve essere pari a:

$$\ell_{\text{s}} = 1.25 \cdot \ell_{\text{ad}} \tag{6.33}$$

essendo la lunghezza ℓ_{ad} data dalle (5.3).

6.8.2.1 Indicazioni specifiche per pilastri

(1) Nei pilastri soggetti a presso-flessione, l'area complessiva delle barre longitudinali di FRP, A_f, non deve essere inferiore al seguente valore minimo:

$$A_{f,min} = \max\left(0.1 \cdot \frac{N_{Sd}}{f_{ftd}}; 0.01 \cdot A_c\right) \tag{6.34}$$

essendo N_{Ed} lo sforzo normale sollecitante di progetto, f_{ftd} la resistenza a trazione di progetto delle barre in FRP, A_c l'area della sezione trasversale dell'elemento.

(2) Il valore massimo raccomandato per l'area complessiva delle barre longitudinali di FRP, A_f, nei i pilastri è:

$$A_{f,max} = 0.04 \cdot A_c \tag{6.35}$$

Nelle zone con sovrapposizione, il valore massimo raccomandato dell'area può essere doppio rispetto al valore dato dalla (6.35).

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

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

6.8.2.2 Indicazioni specifiche per solette

(1) Per solette in calcestruzzo armate con barre di FRP, l'area complessiva delle barre longitudinali di FRP, A_f, nelle due direzioni non deve essere inferiore al seguente valore minimo:

$$A_{f,min} = 0.0025 \cdot A_c \tag{6.36}$$

(2) Quando si esegua il calcolo di solette con modelli tipo trave – senza ricorrere, cioè, al modello bidimensionale di piastra – è possibile determinare il quantitativo della 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, la cui area (per unità di larghezza) non deve risultare inferiore al 20% di quella principale, anch'essa riferita all'unità di larghezza.

6.8.3 Indicazioni sulle armature trasversali

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

6.8.3.1 Indicazioni specifiche per travi

(1) Per travi provviste di armatura trasversale, il valore minimo raccomandato per la percentuale di armatura trasversale, ρ_s, è:

$$\rho_{s,min} = \frac{0.08\sqrt{f_{ck}}}{\varepsilon_{ftd} \cdot E_f} \tag{6.37}$$

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

$$s \le 0.75d \tag{6.38}$$

essendo d l'altezza utile della sezione.

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

$$s \le \min\left(\frac{d}{4}; 12 \text{ min}(d_b); 150 \text{ mm}\right) \tag{6.39}$$

essendo $\min(d_b)$ il diametro minimo delle barre longitudinali presenti nell'elemento.

6.8.3.2 Indicazioni specifiche per pilastri

(1) Nei pilastri il passo s tra le staffe deve rispettare la seguente limitazione funzione del minimo diametro, $\min(d_b)$, delle barre di armatura longitudinali presenti nell'elemento e del valore minimo 250 mm:

$$s \le \min\left(15 \cdot \min(d_b); 250 \text{ mm}\right) \tag{6.40}$$

(2) Il passo tra le staffe deve essere opportunamente ridotto 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:

$$s \le \min\left(\frac{l_{min}}{4}; 100 \text{ mm}\right) \tag{6.41}$$

essendo l_{min} il lato minore della sezione trasversale in calcestruzzo.

6.8.4 Ulteriori dettagli costruttivi

(1) Per le staffe e le barre piegate di FRP, per evitare il danneggiamento delle fibre, il diametro di curvatura deve essere pari ad almeno 7 volte il diametro nominale della barra, d_b (Tabella 3-1). Il Fabbricante deve specificare il diametro del mandrino utilizzato per la piegatura.

(2) La tensione di progetto nelle staffe o nelle barre piegate 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. EN 1992-1-1:2023 (2023) *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

7 VERIFICHE 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 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 più ridotto modulo elastico delle barre di FRP rispetto a quelle di acciaio, soprattutto per le barre di GFRP, le verifiche agli SLE possono essere rilevanti per il dimensionamento degli elementi strutturali armati con tali barre.
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 associato a tale combinazione venga superato durante la vita di progetto dell'opera;
- Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli SLE reversibili e corrispondente ad un carico che è superato per il 10% della vita di progetto 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 di progetto 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 della combinazione quasi-permanente delle azioni. In particolare, sotto azioni quasi-permanenti, le tensioni dovute a carichi prolungati nel tempo devono essere limitate anche al fine di mitigare i fenomeni di viscosità nel calcestruzzo e di fatica statica nelle barre di FRP, qualora questi ultimi inducano 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 ad essi connessi, 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;
- i fenomeni fessurativi risultino opportunamente contenuti, dal momento che fessure troppo numerose o di ampiezza eccessiva potrebbero ridurre la durabilità dell'elemento strutturale e la sua funzionalità, peggiorare l'aspetto e 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, tuttavia, meno stringenti rispetto a quelle usualmente previsti per elementi armati con barre di acciaio.

(4) Le verifiche in condizioni di esercizio possono essere svolte in campo elastico lineare tenendo conto del comportamento della sezione interamente reagente o fessurata, nei tratti dell'elemento strutturale ove la tensione nel calcestruzzo teso, nella combinazione di carico adottata per la verifica, sia, rispettivamente, inferiore o superiore alla sua resistenza a trazione.
Le ipotesi alla base dei calcoli sono:

- conservazione delle sezioni piane, con diagramma lineare delle deformazioni 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 α_f, nel calcolo dell'inerzia e dell'asse neutro. In ogni caso, il contributo delle armature di FRP in zona compressa viene trascurato, ma è consentito non detrarre l'area di calcestruzzo ad esse corrispondente.

(5) Nel caso di azioni di lunga durata (in genere sotto la combinazione quasi-permanente dei carichi), il valore del coefficiente di omogeneizzazione α_f deve tenere in conto l'evoluzione delle deformazioni differite nel calcestruzzo per fenomeni reologici (viscosità, ritiro). In particolare, tali fenomeni possono influenzare i valori delle tensioni massime nei materiali e delle frecce. Se del caso, è necessario considerare anche gli effetti prodotti da variazioni termiche e da eventuali altre distorsioni.

(6) Per le verifiche in condizioni di esercizio è possibile considerare opportuni modelli di "*tension-stiffening*" (si vedano §7.3 e §7.4) per tener conto, nelle zone dove il momento sollecitante nella combinazione delle azioni adottata per la verifica è maggiore del momento di fessurazione della sezione, del contributo del calcestruzzo teso nei conci tra fessure successive.

7.2 STATO LIMITE DI LIMITAZIONE DELLE TENSIONI

(1) Nella combinazione delle azioni rara (o caratteristica), la tensione nelle barre di FRP deve soddisfare la seguente limitazione:

$$\sigma_f \le \eta_T \cdot \eta_a \cdot 0.8 \cdot \frac{f_{ftk0}}{\gamma_f} \tag{7.1}$$

essendo f_{ftk0} la resistenza caratteristica a trazione delle barre di FRP, η_T e η_a i fattori di conversione definiti nel § 4.6 e nella Tabella 4-1, γ_f il fattore parziale del materiale FRP che per verifiche allo stato limite di esercizio si assume pari a 1.0.
Le tensioni nel calcestruzzo compresso vanno limitate in accordo con quanto prescritto nella Normativa vigente.

(2) Per la combinazione delle azioni quasi permanente, la tensione nelle barre di FRP deve soddisfare la seguente limitazione:

$$\sigma_f \le \eta_T \cdot \eta_a \cdot \frac{f_{ftk,c}}{\gamma_f} \tag{7.2}$$

dove i simboli hanno il significato già introdotto al punto (1) e $f_{ftk,c}$ è il valore caratteristico della resistenza a trazione per fatica statica (*creep rupture*) a 100 anni. Qualora tale valore non sia disponibile, si può assumere $f_{ftk,c} = \eta_c \cdot f_{ftk0}$, per cui la (7.2) diventa:

$$\sigma_f \le \eta_T \cdot \eta_a \cdot \eta_c \cdot \frac{f_{ftk0}}{\gamma_f} \tag{7.2b}$$

in cui η_c è il fattore di conversione per effetti di fatica statica (*creep rupture*) a 100 anni definito nel § 4.6 e nella Tabella 4-2.
Le tensioni nel calcestruzzo vanno limitate in accordo con quanto prescritto nella Normativa vigente.

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

- tensione massima di compressione nel calcestruzzo:

$$\sigma_c = \frac{M}{I_2} x_2 \tag{7.3}$$

- tensione di trazione nelle barre di FRP:

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

dove I_2 è il momento di inerzia della sezione in c.a. in condizione fessurata (Stadio 2) in cui si trascura il contributo delle barre di FRP compresse, mentre le barre tese di FRP sono omogeneizzate attraverso il coefficiente α_f; x_2 è la distanza dell'asse neutro della sezione fessurata dal 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 modulo elastico del calcestruzzo E_c va calcolato in funzione della combinazione di azioni in esercizio considerata per la verifica; in particolare, esso può essere assunto pari ad un valore 'efficace' per tener conto dello sviluppo nel tempo di deformazioni differite attraverso la relazione $E_{c,eff} = \frac{E_c}{1+\varphi(t,t_0)}$, 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, in quanto solitamente molto inferiori a quelli che si sviluppano nel calcestruzzo.
In assenza di informazioni specifiche sulle condizioni che inducono fenomeni viscosi, si può assumere in via semplificata $\varphi(t,t_0) = 1$.

7.3 STATO LIMITE DI DEFORMAZIONE

(1) Le deformazioni esibite dagli elementi in calcestruzzo armati con barre di FRP, in particolare i valori massimi delle frecce, devono rispettare le stesse limitazioni imposte dalla Normativa vigente per elementi armati con barre metalliche per strutture analoghe.

(2) Il modello adottato per il calcolo delle frecce deve simulare il comportamento reale dell'elemento strutturale con un livello di accuratezza adeguato agli obiettivi del calcolo. Si deve sicuramente tenere conto della maggiore deformabilità dell'elemento conseguente all'eventuale presenza di fessure nel calcestruzzo teso causate dal superamento della sua resistenza a trazione, ma è

possibile considerare l'effetto irrigidente del calcestruzzo teso tra le fessure. In particolare, il modello meccanico adottato può tenere conto:

- del diverso comportamento delle sezioni in fase non fessurata (Stadio 1) e fessurata (Stadio 2);
- dell'effetto irrigidente del calcestruzzo teso tra le fessure (effetto "*tension-stiffening*") nei tratti dell'elemento dove esse possono essere presenti (nelle zone dell'elemento dove il momento sollecitante nella combinazione delle azioni adottata per la verifica è maggiore del momento di fessurazione della sezione). Qualora tale contributo sia 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 del calcestruzzo funzione della maturazione al momento della messa in carico;
- degli effetti della viscosità e del ritiro nel calcestruzzo;
- della modalità di applicazione del carico, di tipo statico o ciclico.

(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 a quanto indicato al punto (3), è possibile svolgere analisi semplificate analoghe a quelle generalmente adottate per gli elementi inflessi in calcestruzzo armato con barre di acciaio. Interpretazioni di prove di laboratorio hanno, infatti, confermato la validità, anche per travi armate con barre di FRP, del modello semplificato di *tension-stiffening* che prevede di calcolare la freccia come combinazione della freccia relativa allo Stadio 1 (ipotesi di sezioni non fessurate in tutto l'elemento) e di quella relativa allo Stadio 2 (ipotesi di sezioni fessurate in tutto l'elemento), attraverso un coefficiente di *tension – stiffening*:

$$f = f_1 \cdot (1-\gamma) + f_2 \cdot \gamma$$
$$\gamma = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^m \tag{7.5}$$

dove:

- f è la freccia complessiva dell'elemento strutturale,
- f_1 è la freccia calcolata nell'ipotesi di elemento interamente non fessurato, con riferimento, quindi, all'inerzia I_1 della sezione interamente reagente e con armatura tesa di FRP omogeneizzata attraverso α_f ;
- f_2 è la freccia calcolata nell'ipotesi di elemento ovunque fessurato, con riferimento, quindi, all'inerzia I_2 della sezione fessurata, già definita nel §7.2;
- γ è il coefficiente di *tension – stiffening*, in cui:
  - M_{max} è il momento agente nella sezione più sollecitata dell'elemento, da valutarsi con riferimento 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 pari a 2, in assenza di indicazioni più specifiche;
  - β_1 è un coefficiente adimensionale che tiene conto della qualità dell'aderenza delle barre di FRP, 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; in caso di condizione di esposi-

zione 3, il coefficiente β_1 va moltiplicato per il coefficiente di conversione ambientale η_a (Tabella 4-1);
- β_2 è un coefficiente adimensionale 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.

Si evidenzia che i coefficienti m e β_1 dipendono dall'aderenza tra le barre di FRP ed il calcestruzzo circostante. Allo scopo di condurre una valutazione più accurata della deformabilità degli elementi oggetto di verifica, aspetto che potrebbe condizionare il quantitativo minimo di armatura di FRP necessario per soddisfare le limitazioni, si può procedere secondo quanto indicato nell'Appendice D per una calibrazione specifica dei due coefficienti a partire da risultati sperimentali.

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 condizioni di esercizio per proteggere le barre stesse, per aumentare la durabilità del calcestruzzo, e per esigenze estetiche.

(2) Ai fini della verifica dell'apertura delle fessure per elementi armati con barre di FRP, si deve verificare che l'ampiezza caratteristica delle fessure, w_k, non sia superiore ai valori limite, w_{max}, riportati nella Tabella 7-1 per diverse condizioni di esposizione e combinazioni di carico.

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]**
1-2 (ambiente secco interno o esterno)	X0, XC1 secco, XS1	Frequente	0.7
		Quasi permanente	0.6
3 (ambiente permanentemente o ciclicamente acquoso o immersione in terreno naturale e acqua del terreno)	XC1 umido, XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, XS2, XS3, XF3, XF4, XF1, XF2 XA1, XA2, XA3	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 suggerito nel Model Code (*fib* Model Code 2020, 2024), che, rimuovendo l'ipotesi di uguaglianza delle deformazioni in zona tesa tra le armature di FRP ed il calcestruzzo posti alla stessa distanza dall'asse neutro, 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, $(\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm})$. 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 armati con barre di acciaio, il valore caratteristico dell'apertura delle fessure in elementi in calcestruzzo armati con barre di FRP può calcolarsi come segue:

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

dove:

- $k_{1/r} = \dfrac{h - x_2}{d - x_2}$ è un fattore geometrico che tiene conto dell'effetto della curvatura dell'elemento 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;
- ε_{fm} e ε_{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:

$$s_{r,max} = \beta_w \cdot \left(k_c \cdot c_{geom} + k_{\phi/r} \cdot k_{fl} \cdot k_b \frac{f_{ctm} \cdot d_b}{\tau_{mf} \cdot \rho_{l,ef}} \right) \tag{7.7}$$

in cui:

- β_w è un coefficiente che determina il valore massimo (caratteristico) 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 (EN 1992-1-1:2023);
- c_{geom} è il copriferro geometrico, 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_{fl} è un fattore che tiene conto della distribuzione delle tensioni nella sezione prima della fessurazione. Per sezioni rettangolari soggette a flessione, può essere calcolato come: $k_{fl} = \dfrac{h - h_{c,ef}}{h}$, essendo $h_{c,ef}$ l'altezza dell'area di calcestruzzo efficace in trazione definita nel seguito. Per sezioni soggette a trazione pura, k_{fl} è pari a 1.0;
- 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 nominale delle barre di FRP. Nel caso di barre con diametri nominali 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:

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

- τ_{mf} è la tensione media di aderenza agente, in condizioni di esercizio, all'interfaccia tra le barre di FRP ed il calcestruzzo nel tratto tra due fessure, da calcolarsi come $\tau_{mf} = k_{bond} \cdot f_{ctm}$, dove per fessurazione stabilizzata si assume $k_{bond} = 1.50$ per barre di FRP che abbiano una classe 1 di aderenza e 1.25 per barre che abbiano una classe 2 di aderenza; in caso di condizione di esposizione 3, la tensione τ_{mf} va moltiplicata per il coefficiente di conversione ambientale η_a (Tabella 4-1). 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.
- $\rho_{l,ef}$ è la percentuale efficace di rinforzo longitudinale, da calcolarsi come segue:

$$\rho_{l,ef} = \frac{A_f}{A_{c,ef}} \tag{7.9}$$

dove A_f è l'area complessiva delle barre di FRP in zona tesa e $A_{c,ef}$ è l'area di calcestruzzo efficace in trazione (Figura 7-1) che, per sezioni rettangolari o a T con anima tesa, è pari a:

$$A_{c,ef} = b \cdot h_{c,ef} \tag{7.10}$$

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 in zona tesa (Figura 7-1a):

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

- in presenza di n strati di barre tese e distanti in verticale δ_c (Figura 6-1b):

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

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

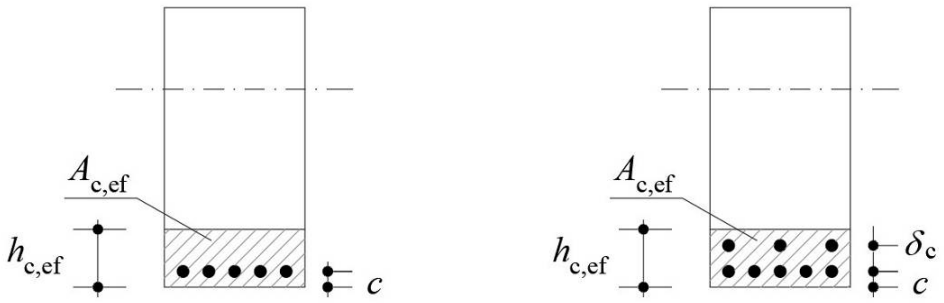


Figura 7-1 - Definizione dell'area di calcestruzzo efficace in trazione: a) singolo strato di armature; b) più strati di armature.

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

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

in cui:

- σ_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;
- $\rho_{l,ef}$ è la percentuale efficace di rinforzo definita dalla (7.9).

(5) In alternativa alle (7.6), (7.7) e (7.13), è possibile adottare modellazioni più 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 indicazioni e 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 elastico delle armature metalliche, mentre le sole armature di FRP in zona tesa devono essere tenute in conto attraverso il coefficiente di omogeneizzazione α_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 β_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 delle verifiche di fessurazione, per tener conto delle diverse tensioni tangenziali di aderenza trasferite dalle due tipologie di armatura ed in assenza di specifiche indicazioni di comprovata validità, il calcolo dell'ampiezza massima delle fessure può essere eseguito con la (7.6), utilizzando la (7.7) e la (7.13), in cui la percentuale di armatura tesa, $\rho_{l,ef}$, si calcola come segue:

$$\rho_{l,ef} = \frac{A_f + \xi_l A_s}{A_{c,ef}} \qquad \xi_l = \frac{1.8}{k_{bond}} \cdot \frac{d_b}{d_{ba}} \tag{7.14}$$

dove d_b e d_{ba} sono i diametri nominali delle barre di FRP e di acciaio, rispettivamente, e k_{bond} è un coefficiente legato alla qualità dell'aderenza delle barre ed è stato definito in precedenza (pari a 1.50 o 1.25 in caso di barre di FRP che ricadono nella Classe di aderenza 1 o 2, rispettivamente). Il valore dell'ampiezza delle fessure calcolata con la (7.6) si intende sempre riferito alla quota delle armature più vicine al bordo teso (entrambe se poste alla stessa quota, barre di FRP se quelle di acciaio sono poste ad una distanza maggiore dal bordo teso). Inoltre, se le armature di FRP e di acciaio sono poste alla stessa quota ($d = d_s$, essendo d e d_s le distanze delle barre di FRP e di quelle metalliche dal bordo superiore compresso, Figura 6-2), nella (7.13), il termine $\frac{\sigma_f}{E_f}$ si può calcolare come deformazione letta alla quota di entrambe le armature ($d = d_s$) nelle consuete ipotesi di sezione fessurata e conservazione della sezione piana. Se le armature di acciaio sono, invece, posizionate ad una distanza dal bordo teso maggiore di quella delle barre di FRP ($d_s < d$), il termine $\frac{\sigma_f}{E_f}$ nella (7.13) e la distanza d nella (7.6) si riferiscono alle sole barre di FRP.

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.

Se le armature di FRP e di acciaio sono poste alla stessa quota ($d = d_s$), l'ampiezza massima delle fessure calcolata alla quota delle armature con la (7.6) deve rispettare gli stessi limiti indicati dalla Normativa vigente per gli elementi di calcestruzzo armati con barre di acciaio. Se le armature di acciaio sono poste ad una distanza dal bordo teso maggiore di quella delle barre di FRP ($d_s < d$), l'ampiezza delle fessure calcolata alla quota d delle armature di FRP con la (7.6) deve rispettare le limitazioni valide per le barre di FRP (Tabella 7-1), mentre l'ampiezza delle fessure calcolata alla

quota d_s delle barre di acciaio deve rispettare i relativi limiti indicati dalla Normativa vigente. Si evidenzia che l'ampiezza delle fessure alla quota delle barre di acciaio si ottiene moltiplicando l'ampiezza delle fessure calcolata alla quota delle barre di FRP con la (7.6) per il fattore geometrico $\frac{d_s - x_2}{d - x_2}$, essendo x_2 la distanza dell'asse neutro dal bordo compresso della sezione fessurata (Stadio 2), d e d_s le distanze precedentemente introdotte.

Bibliografia essenziale

1. EN 1990:2023 (2023) *Eurocode 0: basis of structural and geotechnical design*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
2. EN 1992-1-1:2023 (2023) *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
3. *fib* Model Code 2020 (2024). *fib Model Code for Concrete Structures 2020*, Federation International du Beton, Lausanne, Switzerland.

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 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, quindi, la progettazione può essere riconducibile a quella già affrontata nei capitoli precedenti 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 realizzare elementi strutturali di calcestruzzo armato con barre di FRP e 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 sia $a_g > 0.375g$[1]. 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 ed elementi strutturali non appartenenti allo schema resistente alle azioni sismiche;
b) Strutture che fanno parte dello schema resistente alle azioni sismiche e sono progettate come non dissipative (con fattore di comportamento $1 \le q \le 1.5$);
c) Strutture che fanno parte dello schema resistente alle azioni sismiche e sono progettate in campo dissipativo, con regole ispirate ai concetti di duttilità. In questo caso è necessario progettare strutture con armatura ibrida, cioè utilizzare barre sia di acciaio sia di FRP.

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 ALLE 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 $a_g < 0.375g$[2]. Ricadono in questa categoria:

[1] Il valore dell'accelerazione di ancoraggio dello spettro S $a_g = 0.375g$ corrisponde al limite tra la zona 2 (zona a media sismicità) e la zona 1 (zona ad alta sismicità) come definite dall'OPCM3274 e OPCM3519 in termini di accelerazione massima al suolo con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni ($a_g = 0.25g$) riferita a suolo rigido tipo A, ed assumendo per il coefficiente di suolo S (comprensivo dell'amplificazione stratigrafica e dell'amplificazione topografica) un valore pari a 1.5.

[2] Zone caratterizzate da un valore dell'accelerazione di ancoraggio dello spettro S $a_g < 0.375g$ corrispondono alle zone da sismicità media a molto bassa, in accordo alle definizioni contenute nell'OPCM3274 e OPCM3519 si veda anche quanto riportato in nota n. 1

a) le strutture per le quali l'azione sismica produce incrementi di sollecitazione ridotti 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 (nelle combinazioni non sismiche delle azioni) 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 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 dell'azione sismica, a favore di sicurezza, può essere condotta con riferimento allo spettro di risposta 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 dagli spostamenti della 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 $a_g < 0.225g$[3].

(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. 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:
  - strutture suscettibili di *rocking*;
  - elementi prefabbricati di tamponamento;
- strutture nelle quali siano installati sistemi supplementari di dissipazione o di isolamento;
- strutture di fondazione superficiali e profonde (si veda anche § 8.5);

[3] Zone caratterizzate da un valore dell'accelerazione di ancoraggio dello spettro S $a_g < 0.225g$ corrispondono alle zone da sismicità bassa a molto bassa, in accordo alle definizioni contenute nell'OPCM3274 e OPCM3519 in analogia a quanto riportato in nota n. 1.

- strutture di protezione delle coste, muri di sostegno.

Nel caso dei ponti, una progettazione con criteri non dissipativi richiede di utilizzare q=1.

(3) Nell'elenco riportato al punto (2), è di particolare rilevanza il caso 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 che 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).

(4) Nel caso di tipologie strutturali particolarmente vulnerabili all'azione sismica è opportuno assumere un valore di q pari a 1. In tali strutture possono ricadere:

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

(5) 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).

8.4 STRUTTURE PROGETTATE IN CAMPO DISSIPATIVO

(1) Questa categoria di strutture è realizzabile in zone a sismicità da molto bassa a media per le quali allo SLV il valore dell'accelerazione di ancoraggio dello spettro S $a_g < 0.375g$[4].

(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 dalla Normativa 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").

[4] Zone caratterizzate da un valore dell'accelerazione di ancoraggio dello spettro S $a_g < 0.375g$ corrispondono alle zone a sismicità da molto bassa a media, in accordo alle definizioni contenute nell'OPCM3274 e OPCM3519 si veda anche quanto riportato in nota n. 1.

(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 sovra-resistenza da adottare nella progettazione devono essere valutati in relazione all'effettiva armatura di FRP presente e non possono essere utilizzati quelli validi per le sezioni in calcestruzzo armate con barre metalliche.

(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. Si riportano ad esempio due approcci:

a) Approccio n. 1 per la progettazione delle armature ibride:
   - Le armature longitudinali sono di acciaio e di FRP: le barre di acciaio sono disposte più interne e quelle di FRP più esterne;
   - Le armature trasversali sono di acciaio e di FRP e sono disposte come segue:
     - nelle parti più interne nella sezione: staffe di acciaio nelle zone critiche a confinare, assieme alle armature longitudinali metalliche, il calcestruzzo;
     - nelle parti più esterne nella sezione: staffe di FRP a costituire, unitamente alle barre longitudinali di FRP, la gabbia di armature lungo l'intero elemento strutturale, cui è demandata la resistenza a taglio.

b) Approccio n. 2 per la progettazione delle armature ibride:
   - Le armature longitudinali sono di acciaio e di FRP, dove:
     - 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";
     - 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 di acciaio e di FRP e sono disposte come segue:
     - Staffe di acciaio nelle zone critiche a confinare il calcestruzzo;
     - 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 da quelli descritti al punto (7), 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 di 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, assegnando 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 un comportamento strutturale non dissipativo;
- desumendole dalla capacità di resistenza a flessione degli elementi, congiuntamente al taglio determinato da considerazioni di equilibrio;
- desumendole dalle azioni trasferite dagli elementi soprastanti, nell'ipotesi di comportamento strutturale dissipativo, e amplificate 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 in base al momento derivante da uno dei primi due approcci.

(4) In caso di fondazioni su plinti con 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 nelle barre a valle di un evento sismico.

9 PRESCRIZIONI RELATIVE ALL'ESECUZIONE

9.1 SPEDIZIONE DEL 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 di resistenza 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 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 la durabilità, le proprietà di resistenza e di 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 differentemente 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 sabbiatura 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 comprometterne la durabilità, le proprietà di resistenza e di aderenza al calcestruzzo.

(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 Fabbricanti. Le seguenti indicazioni, in linea con le normative internazionali, garantiscono l'integrità strutturale e la durabilità delle barre di FRP utilizzate nelle costruzioni in calcestruzzo.

(2) Qualsiasi barra che presenti una superficie esterna danneggiata o comunque alterata durante il trasporto o le movimentazioni in cantiere deve essere scartata e sostituita previo confronto anche con il Fabbricante 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 Fabbricante 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 Fabbricante 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 armature ibride in cui le barre di FRP siano in fibra di carbonio, è necessario evitare il contatto diretto fra le barre di acciaio e quelle di carbonio. 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.

9.5 CONTROLLO DELLA POSA IN OPERA

(1) Tutte le attività relative alla posa in opera delle barre di FRP devono essere soggette a verifiche sistematiche al fine di accertare la conformità ai documenti di progetto, alle specifiche del Fabbricante e ai requisiti delle presenti Istruzioni.

(2) La Direzione Lavori deve assicurare che, prima e durante la posa in opera, vengano eseguiti i seguenti controlli:

- verifica dell'identificazione e della tracciabilità di ciascun lotto, comprendente Fabbricante, denominazione commerciale, diametro e classe di resistenza delle singole barre;
- conferma che le condizioni di stoccaggio e di movimentazione non abbiano indotto deterioramenti superficiali, contaminazioni o danneggiamenti meccanici;
- verifica che posizionamento delle barre, copriferro del calcestruzzo, allineamento e spaziature siano conformi ai disegni approvati e alle tolleranze prescritte;
- conferma che le barre piegate o le gabbie prefabbricate rispettino il raggio minimo di curvatura certificato e la documentazione del Fabbricante.

(3) Qualsiasi barra che presenti fessure, delaminazioni, scolorimenti, fibre esposte o abrasioni superficiali deve essere scartata e sostituita, salvo approvazione congiunta del Fabbricante e della Direzione Lavori dopo opportuna valutazione.

(4) Durante il getto del calcestruzzo, la Direzione Lavori deve verificare che le armature rimangano correttamente fissate e posizionate, e che le operazioni di vibrazione non generino urti o sollecitazioni eccessive sulle barre o sulle staffe di FRP.

(5) Al termine del getto, deve essere redatto un rapporto finale contenente:

- identificazione delle barre di FRP installate;
- riferimenti ai certificati di lotto e alle prove di qualificazione;
- esito delle ispezioni in cantiere ed eventuali misure correttive adottate;
- conferma della conformità alle prescrizioni di progetto e alle indicazioni del Fabbricante.

(6) Tutta la documentazione, inclusi documenti di consegna, certificati di conformità e rapporti di ispezione, deve essere allegata alla dichiarazione di corretta esecuzione redatta dal Direttore dei Lavori per l'intera vita di progetto della struttura o per il periodo previsto dalle Normative vigenti.

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 non riportino criteri di progetto specifici per tali applicazioni, è utile citare alcuni degli ulteriori possibili ambiti di utilizzo delle barre di FRP.

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 bars*) 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 di progetto 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/R2-2026. Le caratteristiche geometriche e meccaniche delle barre di FRP utilizzate per la tecnica NSM devono essere valutate secondo le indicazioni contenute nelle presenti Istruzioni.

(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 s.r.l.).

10.2.2 Ristilatura armata di giunti di malta in elementi di muratura

(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 in-

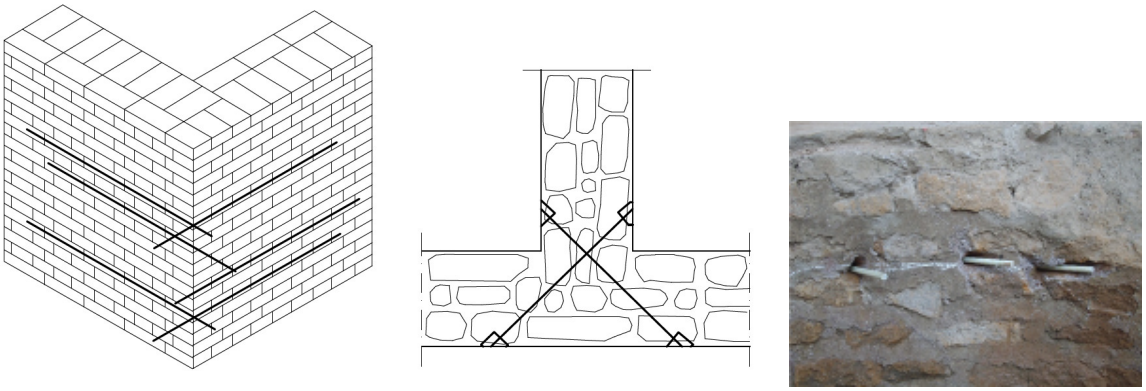
crementi di resistenza e di rigidezza dell'elemento murario in funzione dello spessore della muratura e della profondità della ristilatura e, in misura maggiore, se l'intervento è realizzato su entrambi i lati del paramento murario. Il collegamento delle barre inserite nei giunti di malta con ulteriori elementi resistenti a trazione ed utilizzati come connettori trasversali disposti lungo lo spessore 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/R2-2026 per la tecnica NSM, adottando come proprietà meccaniche del supporto quelle della malta utilizzata per la ristilatura dei giunti. Le caratteristiche geometriche e meccaniche delle barre di FRP utilizzate per la ristilatura armata dei giunti di malta devono essere valutate secondo le indicazioni contenute nelle presenti Istruzioni.

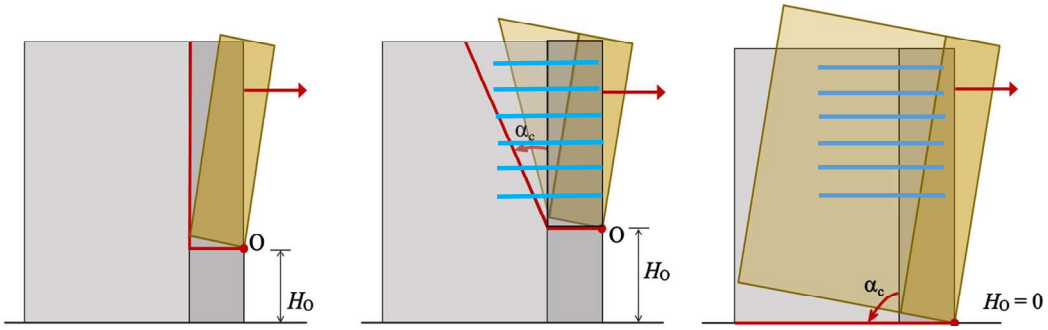
Figura 10-2 - Applicazione di barre di FRP come armatura per la ristilatura dei giunti in paramenti murari (www.mapei.it).

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 (4.3). Le caratteristiche geometriche e meccaniche delle barre di FRP utilizzate nelle iniezioni armate devono essere valutate secondo le indicazioni contenute nelle presenti Istruzioni.



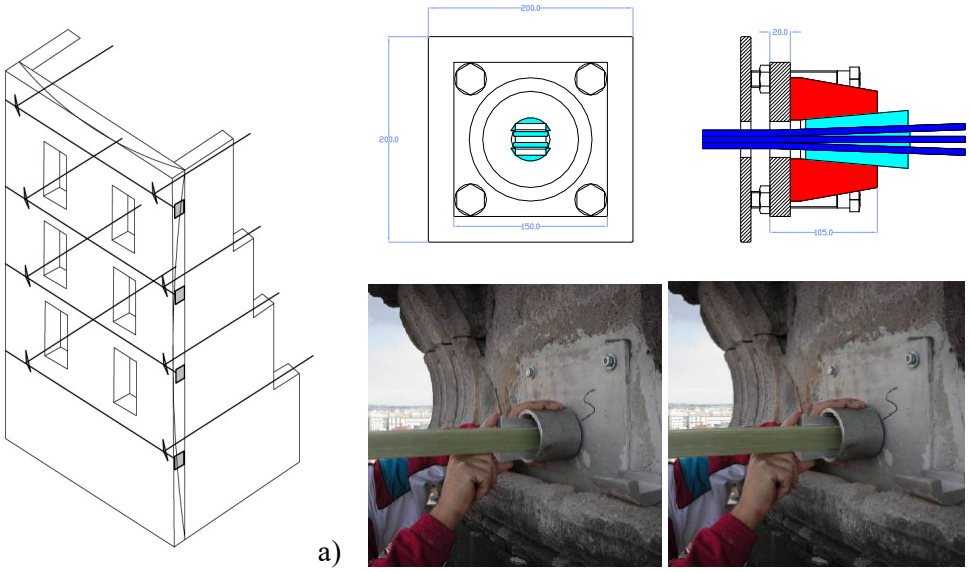
(a)



(b)

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_o della cerniera e dall'angolo di inclinazione della lesione α_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). Le caratteristiche geometriche e meccaniche delle barre di FRP utilizzate come tiranti devono essere valutate secondo le indicazioni contenute nelle presenti Istruzioni. 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 (4.3).
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.



a) b)

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

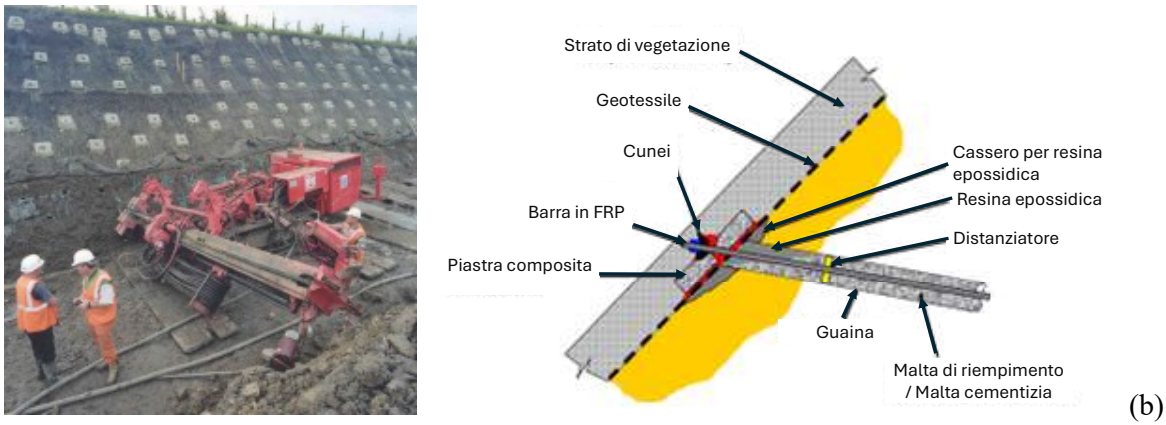
1. Ceroni F., Prota A. (2009*) Case study: seismic upgrade of a masonry bell tower by GFRP ties*, ASCE Journal of Composite for Construction, 13 (3): 188-197.
2. Ceroni F., Di Ludovico M. (2020) *Traditional and innovative systems for injected anchors in masonry elements: experimental behaviour and theoretical formulations*, Construction and Building Materials, 254, 10.1016/j.conbuildmat.2020.119178.
3. De Lorenzis, L., 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), 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000579.
6. Istruzioni CNR DT200/R2-2026, *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., Incerti A., Savoia M. (2025) *In-plane shear strengthening of masonry panels using pultruded FRP rebars*, Construction and Building Materials, 493, 10.1016/j.conbuildmat.2025.143144
8. *fib* bulletin 90 (2019) *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, 285, 10.1016/j.engstruct.2023.115991.

10.3 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. (Figura 10-5a) o direttamente inseriti in fori realizzati in precedenza nel terreno e poi cementati (*soil nails*, Figura 10-5b). Le barre di FRP so-

no 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 (4.3).

(a)



(b)

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

(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 di progetto delle strutture realizzate in prossimità delle coste con una significante 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. Steputat C.C., O'Connor J., Arrants M., Beech J., Nanni A. (2022) *GFRP-RC seawalls as a means of coastal fortification and extended service life,* Concrete International, Nov 2022, pp. 36-42.

10.4 BARRE DI FRP PER STRUTTURE TEMPORANEE

(1) Le barre in FRP possono essere utilizzate come '*soft-eyes'* (Mohameda et al., 2020) per la realizzazione di scavi sotterranei (per esempio in scavi metropolitani). La possibilità di tagliare facilmente le 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-b) che possono essere facilmente tagliate dalla TBM (Figura 10-7c). 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 (2007); b) metropolitana di Roma (per gentile concessione di ATP s.r.l.); c) https://www.dextragroup.com/ground-engineering/tunneling/astec-soft-eyes/.

Bibliografia essenziale

1. Mohameda H.M., Alia A.H., Hadhooda A., Mousab S., Abdelazima W., Benmokrane B. (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 possono essere 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 e sono in grado, pertanto, di evitare o comunque limitare il degrado dovuto all'ambiente marino.

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

Bibliografia essenziale

1. Roghani H., De Caso F., Nanni A. (2022) *Constructability of Slabs-On-Ground with FRP meshes as secondary reinforcement*, 15th 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 BARRE DI FRP COME ARMATURA DI ELEMENTI ESPOSTI AD INTERFERENZE ELETTROMAGNETICHE

(1) Nelle infrastrutture viarie sono presenti impianti che possono essere sensibili alle interferenze elettromagnetiche, quali impianti di rilevamento del passaggio dei treni, impianti di scambio per ferrovie/tramvie, impianti per il funzionamento delle metropolitane automatiche, impianti rilevamento passaggio caselli autostradali, ecc… Le tradizionali armature di acciaio possono interferire con le onde elettromagnetiche di questi impianti e, quindi, comprometterne il corretto funzionamento. Le barre di 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 s.r.l.).

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 2018), 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), che 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 suddette NTC 2018.

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 redatta dal 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 Products 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), 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 all'atto dell'immissione del prodotto sul mercato assumendosi la responsabilità della conformità del prodotto a quanto dichiarato.

Si evidenzia che allo stato attuale non esistono norme armonizzate (hEN) per le barre di FRP, ma per la loro qualificazione 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 in Italia 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** 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

L'appartenenza alle classi di resistenza riportate in Tabella 3-3 e la legittimazione all'impiego di un prodotto deve essere garantita dalla valutazione, durante il processo di qualificazione eseguito in accordo a *EAD-barre FRP* o a *LG-barre FRP*, delle caratteristiche obbligatorie riportate in Tabella 3-1 e dal conseguimento di valori maggiori o uguali a quelli riportati nella stessa Tabella 3-1.
Oltre alle caratteristiche obbligatorie riportate nella Tabella 3-1, possono essere qualificate altre caratteristiche fisiche e meccaniche delle barre di FRP e, in particolare, quelle descritte nella successiva Tabella 11-1. Analogamente a quanto prescritto per le caratteristiche obbligatorie, per le modalità di determinazione di queste ulteriori proprietà si può fare riferimento all'*EAD-barre FRP* o alla *LG-barre FRP*.

Bibliografia essenziale

1. EAD 260023-00-0301 (2024) *Carbon, glass, basalt and aramid fibre reinforced polymer bars as reinforcement of structural elements*, adopted on January 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.

Tabella 11-1 – 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_{fcm}, f_{fck} [MPa]	*EAD-barre FRP* §2.2.3 *LG-barre FRP* – Tab. 2
2	Modulo a compressione longitudinale (valore medio)	E_{fc} [GPa]	*EAD-barre FRP* §2.2.3 *LG-barre FRP* – Tab. 2
3	Deformazione a rottura (valore medio e caratteristico)	ε_{ft0}, ε_{ftk0} [mm/mm]	*EAD-barre FRP* §2.2.2 *LG-barre FRP* – Tab. 2
4	Resistenza di aderenza da prove di estrazione (*pull-out*) da supporti in calcestruzzo (valori medi): - Calcestruzzo C20/25, posizione centrata dopo esposizione ad ambiente alcaline - Calcestruzzo C20/25, posizione eccentrica in condizioni standard (copriferro c_b) - Calcestruzzo C20/25, posizione centrata alla massima temperatura di esercizio - Calcestruzzo C50/60, posizione centrata in condizioni standard	$\tau_{b,a}$ [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	Resistenza a trazione per fatica ($2 \cdot 10^6$ 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	Resistenza a trazione per fatica statica (*creep*): - Resistenza a rottura per *creep* ad un milione di ore (100 anni) in condizioni standard (valore caratteristico) - Resistenza a rottura per *creep* ad un milione di ore (100 anni) con esposizione in ambiente alcalino a 60 °C (valore caratteristico)	$f_{ftk,c}$ [MPa] $f_{ftk,ca}$ [MPa]	*EAD-barre FRP* §2.2.8 *LG-barre FRP* – Tab. 3
7	Coefficiente di dilatazione termica longitudinale	$\alpha_{sp,L}$ [°C^{-1}]	*EAD-barre FRP* §2.2.9 *LG-barre FRP* – Tab. 1
8	Coefficiente di dilatazione termica trasversale	$\alpha_{sp,T}$ [°C^{-1}]	*EAD -barre FRP* §2.2.10 *LG-barre FRP* – Tab. 1
9	Temperatura di fusione *(per barre di FRP in materiale termoplastico e semicristallino)*	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	$R_{\Delta m}$ [%] $R_{et,t}^{1000}$ [%] $R_{et,i}^{1000}$ [%] $R_{et,i}^{3000}$ [%]	*EAD-barre FRP* §2.2.16 *LG-barre FRP* – Tab. 2
13	Reazione al fuoco	Classe	*EAD-barre FRP* §2.2.17 *LG-barre FRP* – Tab. 2

12 APPENDICE B: Definizione e calibrazione dei fattori parziali delle barre di FRP

12.1 DEFINIZIONE DEI FATTORI PARZIALI

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 espresso dai fattori parziali si basa sulle indicazioni dell'EN 1990 (EN 1990, 2023). Nella definizione del valore di calcolo della generica proprietà di resistenza R_d è possibile distinguere il fattore parziale γ_{Rd} che copre le incertezze sul modello di resistenza e sulle deviazioni geometriche e il fattore parziale γ_m, che riguarda le sole incertezze del materiale:

$$R_d = R\left\{X_{d,i}; a_{d,i}\right\} = R\left\{\eta \frac{X_{k,i}}{\gamma_m \cdot \gamma_{Rd}}; a_{d,i}\right\} \tag{12.1}$$

dove (come suggerito anche dall'EN 1990, §8.3.5.1(2)), i fattori parziali γ_m e γ_{Rd} sono combinati in un unico fattore parziale delle proprietà del materiale γ_f (EN 1990, § C.4.3):

$$\gamma_f = \gamma_m \cdot \gamma_{Rd} \tag{12.2}$$

Nella (12.1) $R\{\cdot\}$ è un'opportuna funzione che esprime lo specifico modello di resistenza considerato i cui argomenti sono, in generale, parametri meccanici X_i e geometrici a_i, di cui $X_{d,i}$ e $a_{d,i}$ sono i valori di progetto (EN 1992-1-1:2023). η è il fattore di conversione che tiene conto complessivamente della riduzione delle proprietà meccaniche per effetto dell'esposizione a condizioni ambientali diverse da quelle ordinarie, quali umidità e temperatura, dell'invecchiamento, di effetti di scala, e di qualsiasi altro parametro rilevante.

Nei paragrafi successivi, si procederà, pertanto, a valutare per le barre di FRP, sulla base di valutazioni statistiche di dati sperimentali e di modelli presenti in letteratura, i seguenti fattori parziali:

- il fattore parziale del materiale, γ_m, che tiene conto solo delle incertezze legate alle proprietà meccaniche del materiale, considerando la possibilità di una deviazione sfavorevole della proprietà del materiale dal suo valore caratteristico, e che verrà valutato nel §12.2;
- il fattore parziale associato alle incertezze sul modello di resistenza e alle deviazioni geometriche, γ_{Rd}, che verrà valutato nel §12.3.1 per il modello resistente a flessione e nel §12.4 per i modelli resistenti del taglio e del confinamento;
- il fattore parziale delle barre di FRP, γ_f, calcolato in base alla (12.2) come prodotti dei precedenti, che verrà valutato nel §12.3.2 e nel §12.3.3 con due diversi approcci per le verifiche flessionali e nel §12.4 per le verifiche a taglio e per gli effetti del confinamento.

12.2 VALUTAZIONE DEL FATTORE PARZIALE DEL MATERIALE, γ_m

Per la determinazione del fattore parziale del materiale, γ_m, è stata condotta una indagine statistica sui risultati delle prove di resistenza a trazione, eseguite ai fini della qualificazione, di 8 diverse tipologie di barre in GFRP, con diametro variabile tra 6 mm e 25 mm, di Fabbricanti nazionali ed internazionali, sottoposti a prove in 5 differenti laboratori universitari Europei, utilizzando la medesima metodologia di prova in accordo a quanto indicato in *EAD-barre FRP* (EAD 260023-00-0301, §2.2.2).
Raggruppando i risultati sperimentali per diametri uguali, 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 per la distribuzione log-normale a 3 parametri sono dati dalle seguenti espressioni (EN 1990, 2023):

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

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

in cui:

- μ_X, σ_X e ϑ sono i parametri della distribuzione log-normale a 3 parametri (media e deviazione standard della variabile X e soglia, rispettivamente) e γ l'asimmetria;
- α_R è il fattore di sensibilità secondo il First Order Reliability Method (FORM);
- β è il valore obiettivo dell'indice di affidabilità, funzione della classe di conseguenza della struttura e del periodo di riferimento (EN 1990, 2023);
- Φ 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 γ_m è quindi dato da:

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

in cui i valori di progetto e caratteristico sono determinati con le (12.3) e (12.4) per ciascun diametro sottoposto a prova. Si noti che nella (12.5) non è stato considerato il fattore complessivo di conversione η, in quanto le prove di trazione utilizzate per la calibrazione sono state condotte in condizioni ambientali ordinarie. I valori degli η_i riportati nelle Tabelle 4-1 e 4-2 sono stati quindi definiti sulla base di indicazioni presenti in letteratura.

Nella (12.3), si è posto α_R = 0.8, in quanto si assume che la variabile X legata al materiale sia dominante rispetto alle altre variabili (incertezze del modello di resistenza e della geometria) che influenzano il calcolo del fattore γ_f secondo la (12.2) (EN 1990, 2023). Si è assunto, inoltre, β = 3.8 sulla base di quanto suggerito nella Tabella C.3 di (EN 1990) adottando una classe di conseguenza CC2 e periodo di riferimento di 50 anni.

La (12.5) ha fornito valori di γ_m variabili tra 1.02 e 1.07 al variare del diametro (Franco et al., 2025). Le stesse valutazioni statistiche effettuate per le classi di resistenza definite in Tabella 3-3, raggruppando, cioè, assieme tutti i diametri appartenenti ad una medesima classe di resistenza, hanno portato a valori di γ_m variabili tra 1.04 ed 1.08. A vantaggio di sicurezza, si può, pertanto, assumere un fattore parziale del materiale pari a γ_m=1.08. In tal caso, il coefficiente di variazione della resistenza, $V_X = \sigma_X/\mu_X$, risulta pari a 0.07.

12.3 VALUTAZIONE DEL FATTORE PARZIALE DELLE BARRE DI FRP γ_f PER VERIFICHE FLESSIONALI

12.3.1 Valutazione del fattore parziale delle incertezze geometriche e del modello di resistenza a flessione, γ_{Rd}

Il fattore parziale γ_{Rd} che considera le incertezze relative al comportamento delle barre di FRP inserite nel calcestruzzo e soggette a tensioni normali (essenzialmente prodotte da sollecitazioni flessionali o di pressoflessione) può essere calcolato 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 $\gamma_{Rd,geo}$:

$$\gamma_{Rd} = \gamma_{Rd,mod} \cdot \gamma_{Rd,geo} \tag{12.6}$$

Se si assume una distribuzione normale per entrambe le incertezze del modello, i coefficienti parziali possono essere definiti dalle seguenti espressioni (*fib* bullettin 80, 2016):

$$\gamma_{Rd,mod} = \frac{\mu_{\theta R,mod}}{\theta_{Rd,mod}} = \frac{1}{1-\alpha_R \cdot \beta \cdot V_{\theta R,mod}} = \frac{1}{1-0.4 \cdot 0.8 \cdot \beta \cdot V_{\theta R,mod}} \tag{12.7}$$

$$\gamma_{Rd,geo} = \frac{\mu_{\theta R,geo}}{\theta_{Rd,geo}} = \frac{1}{1-\alpha_R \cdot \beta \cdot V_{\theta R,geo}} = \frac{1}{1-0.4 \cdot 0.8 \cdot \beta \cdot V_{\theta R,geo}} \tag{12.8}$$

dove $\mu_{\theta R,mod}, V_{\theta R,mod}$ e $\mu_{\theta R,geo}, V_{\theta R,geo}$ sono, rispettivamente, i valori medi e i coefficienti di variazione delle variabili aleatorie $\theta_{R,mod}$ e $\theta_{R,geo}$ che descrivono le incertezze relative al modello di resistenza e alla geometria, rispettivamente. Nelle (12.7) e (12.8), si è utilizzato un valore ridotto del coefficiente $\alpha_R = 0.4 \cdot 0.8 = 0.32$, così come previsto dal *fib* bulletin 80 (§ 4.1.3, eq. 4.1-20), in quanto le incertezze del modello di resistenza e della geometria sono assunte come variabili non dominanti, ma si è ipotizzata come dominante la variabile X che rappresenta la resistenza del materiale (ipotesi già assunta nel §12.2).

Nel caso di elementi in calcestruzzo con barre di acciaio, sulla base di valutazioni statistiche relative a prove sperimentali di flessione pura, l'Eurocodice 2 (EN 1992-1-1, 2023, Appendice A) suggerisce di adottare un coefficiente di variazione di modello per la flessione pari a $V_{\theta R,mod} = 0.045$; in assenza di analoghe valutazioni statistiche per elementi in calcestruzzo con barre di FRP ed in considerazione del comportamento fragile delle barre di FRP, a vantaggio di sicurezza, si adotta un coefficiente di variazione di modello maggiore e pari a $V_{\theta R,mod} = 0.06$.

Le incertezze geometriche relative all'area delle armature 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, invece, in cui 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 avere un'influenza non trascurabile. Si può, tuttavia, ipotizzare che tali incertezze non dipendano dal materiale e che, quindi, possano essere assunte pari a quelle adottate per elementi con armature metalliche. Il coefficiente di variazione associato all'incertezza della geometria viene espresso nell'Eurocodice 2 (EN 1992-1-1, 2023, Appendice A) in funzione dell'altezza utile *d* della sezione (espressa in mm), come segue:

$$V_{\theta R,geo} = 0.05[200/d]^{2/3} \tag{12.9}$$

Tale coefficiente di variazione viene in genere calcolato per gli elementi con armature metalliche assumendo nella (12.9) $d = 200$ mm, da cui si ottiene $V_{\theta R,geo} = 0.05$. Adottando per gli elementi con barre di FRP lo stesso valore per $V_{\theta R,geo}$ ed introducendo, quindi, $V_{\theta R,mod} = 0.06$ e $V_{\theta R,geo} = 0.05$ nella (12.7) e (12.8), si ottiene:

$$\gamma_{Rd,mod} = 1.08\,,\ \gamma_{Rd,geo} = 1.06 \tag{12.10}$$

Tali valori sono inferiori o comparabili con il fattore parziale stimato per il materiale nel §12.2 (γ_m=1.08) e giustificano, pertanto, l'ipotesi di assumere la resistenza del materiale come variabile dominante, anche in considerazione della scelta conservativa adottata per la stima delle incertezze del modello di resistenza.

Utilizzando per $\gamma_{Rd,mod}$ e $\gamma_{Rd,geo}$ i valori dati dalla (12.10), si ottiene, quindi, un valore del fattore parziale che tiene complessivamente conto delle incertezze del modello di resistenza e della geometria, γ_{Rd}, per le barre di FRP soggette a sollecitazioni flessionali pari a:

$$\gamma_{Rd} = \gamma_{Rd,mod} \cdot \gamma_{Rd,geo} = 1.08 \cdot 1.06 = 1.15 \quad (12.11)$$

Per confronto, si consideri che il fattore parziale per l'incertezza del modello di resistenza flessionale per le barre di FRP viene assunto pari ad $\gamma_{Rd,mod} = 1.10$ dal Model Code 2020 (§17.8.1.1, *fib* MC 2020, 2024), mentre il fattore per le incertezze geometriche utilizzato per l'acciaio è assunto pari a $\gamma_{Rd,geo} = 1.05$ nel Model Code 2010 (*fib* Bulletin 65, 2012). L'utilizzo combinato di questi due valori nella (12.11) fornisce $\gamma_{Rd} = 1.16$, in linea con il valore precedentemente calcolato.

12.3.2 Valutazione del coefficiente parziale delle barre di FRP γ_f secondo EN 1990

Considerando i valori riportati nel §12.3.1 dei fattori parziali per le incertezze del modello a flessione e della geometria ($\gamma_{Rd,mod} = 1.08$ e $\gamma_{Rd,geo} = 1.06$, che hanno fornito $\gamma_{Rd} = \gamma_{Rd,mod} \cdot \gamma_{Rd,geo} = 1.15$) ed adottando, a vantaggio di sicurezza, il maggiore dei valori del fattore parziale del materiale ($\gamma_m = 1.08$) calcolati nel §12.2, è possibile, quindi, determinare il fattore parziale complessivo per le barre di FRP come:

$$\gamma_f = \gamma_{Rd} \cdot \gamma_m = 1.15 \cdot 1.08 \cong 1.24 \quad (12.12)$$

12.3.3 Valutazione del coefficiente parziale delle barre di FRP γ_f secondo EN 1992-1-1

In alternativa all'approccio presentato nel §12.1 ed alle relative procedure descritte nel §12.2 e §12.3, nell'Appendice A dell'EN 1992-1-1 (EN 1992-1-1, 2023), è riportata una differente metodologia per la valutazione del fattore parziale complessivo γ_f. In particolare, γ_f può essere calcolato tramite la seguente espressione:

$$\gamma_f = \frac{\exp\left(\alpha_R \cdot \beta \cdot V_{Rf}\right)}{\mu_{Rf}} \quad (12.13)$$

dove:

- α_R è il fattore di sensibilità della resistenza, pari a 0.8;
- β è il valore dell'indice di affidabilità, pari a 3.8 (Classe di conseguenza CC2, periodo di riferimento di 50 anni);
- V_{Rf} è il coefficiente di variazione complessivo che può essere calcolato in funzione dei coefficienti di variazione associati alle varie incertezze definite in precedenza, come segue:

$$V_{Rf} = \sqrt{V_m^2 + V_{\theta R,mod}^2 + V_{\theta R,geo}^2} \quad (12.14)$$

  in cui V_m è il coefficiente di variazione associato alle incertezze del materiale, $V_{\theta R,mod}$ quello associato al modello di resistenza, $V_{\theta R,geo}$ quello associato alla geometria. In particolare, per V_m si è assunto il valore massimo desunto dalle analisi statistiche effettuate sul database disponibile di prove sperimentali (0.07, come definito nel §12.2), per l'incertezza della geometria si è assunto lo stesso valore, $V_{\theta R,geo} = 0.05$, adottato nel §12.3.1 ed ottenuto per d=200 mm dalla (12.9), ed, analogamente, per l'incertezza del modello resistente a flessione si è adottato $V_{\theta R,mod} = 0.06$, come già descritto nel §12.3.1;

- μ_{Rf} è il fattore di errore (*bias factor*) della resistenza che può essere calcolato come segue:

$$\mu_{Rf} = \mu_m \cdot \mu_{\theta R,mod} \cdot \mu_{\theta R,geo} \quad (12.15)$$

in cui i singoli termini rappresentano i fattori di errore associati all'incertezza del materiale, del modello di resistenza, e della geometria: le loro espressioni sono riportate nella Tabella 12-1 insieme ai valori dei coefficienti di variazione.

Utilizzando la (12.13) ed i valori riportati in Tabella 12-1, si ottiene il seguente valore del fattore parziale complessivo, γ_f:

$$\gamma_f = \frac{\exp\left(\alpha_R \cdot \beta \cdot V_{Rf}\right)}{\mu_{Rf}} = \frac{\exp\left(0.8 \cdot 3.8 \cdot 0.105\right)}{1.16} = 1.18 \tag{12.16}$$

Tabella 12-1 – Dati statistici assunti per il calcolo del fattore parziale delle barre, γ_f

Variabile	Coefficiente di variazione	Fattore di errore (bias factor)
Resistenza a trazione	$V_m = 0.07$	$\mu_m = \exp(1.645\, V_m)$
Incertezza geometrica (Altezza utile d in mm)	$V_{\theta R,geo} = 0.05[200/d]^{2/3}$	$\mu_{\theta R,geo} = 1 - 0.05[200/d]^{2/3}$
Incertezza di modello	$V_{\theta R,mod} = 0.06$	$\mu_{\theta R,mod} = 1.09$
Resistenza delle barre di FRP (d =200 mm)	$V_{Rf} = \sqrt{V_m^2 + V_{\theta R,mod}^2 + V_{\theta R,geo}^2} = 0.105$	$\mu_{Rf} = \mu_m \cdot \mu_{\theta R,mod} \cdot \mu_{\theta R,geo} = 1.16$

12.3.4 Valore del coefficiente parziale delle barre di FRP γ_f adottato nelle presenti Istruzioni per verifiche flessionali

Nelle presenti Istruzioni si assume che le verifiche flessionali allo SLU di elementi in calcestruzzo armati con barre di FRP siano condotte adottando nel calcolo della resistenza di progetto delle barre di FRP il fattore parziale $\gamma_f = 1.25$, leggermente conservativo rispetto al valore ($\gamma_f = 1.24$) stimato dalla (12.12) secondo la procedura suggerita in (EN 1990:2023) e descritta nel §12.3.1 e nel §12.3.2.

Tale valore è comprensivo di tutte le incertezze illustrate in precedenza (incertezza del modello di resistenza ed incertezze geometriche nel caso di comportamento flessionale, incertezza della resistenza a trazione delle barre di FRP). Esso può essere, quindi, utilizzato senza ulteriori fattori parziali per ottenere, a partire dal valore caratteristico associato ad una data classe di resistenza delle barre di FRP, il valore di progetto della resistenza a trazione da impiegare nel calcolo del momento resistente di sezioni in calcestruzzo armate con tali barre. In funzione delle condizioni di esposizione della struttura, il valore di progetto della resistenza a trazione delle barre di FRP potrà tenere conto anche degli opportuni fattori di conversione, come indicato nella (4.4).

12.4 VALUTAZIONE DEL FATTORE PARZIALE DELLE BARRE DI FRP γ_f IN PRESENZA DI SOLLECITAZIONI TAGLIANTI E PER IL CONFINAMENTO

Per la stima del fattore parziale γ_f da utilizzare nella valutazione della resistenza a taglio di elementi in calcestruzzo armati con staffe di FRP, in base a quanto esposto nel §12.1, è necessario stimare i fattori parziali γ_m, $\gamma_{Rd,mod}$ e $\gamma_{Rd,geo}$.

Per le barre di FRP rettilinee, nel §12.2 è stato stimato il fattore parziale associato alla sola incertezza del materiale ($\gamma_m = 1.08$) sulla base di analisi statistiche di dettaglio condotte su un elevato numero di dati sperimentali di prove di trazione. Poiché per la resistenza a trazione delle staffe di FRP, individuata dalla resistenza della parte piegata, f_{ub}, non esistono al momento sufficienti prove sperimentali per eseguire analoghe valutazioni, in maniera cautelativa, si adotta un valore maggiore del fattore parziale, $\gamma_m = 1.15$, ottenuto ipotizzando una distribuzione log-normale della resistenza con coefficiente di variazione pari a $V_m = 0.10$ e ritenendo che la resistenza f_{ub} sia affetta da una maggiore dispersione rispetto alla resistenza a trazione delle barre rettilinee di FRP.

Il fattore parziale $\gamma_{Rd} = \gamma_{Rd,mod} \cdot \gamma_{Rd,geo}$ dovrebbe essere stimato sulla base di confronti tra dati sperimentali e modelli predittivi a taglio, ma è possibile, tuttavia, adottare la stessa metodologia utilizzata nel caso di sollecitazioni flessionali. In particolare, per le incertezze della geometria si adotta lo stesso coefficiente di variazione utilizzato per la flessione, $V_{\theta R,geo} = 0.05$, mentre per le incertezze del modello a taglio si adotta un coefficiente di variazione $V_{\theta R,mod} = 0.10$, maggiore di quello adottato per la flessione, come proposto in letteratura. Pertanto, sulla base di tali assunzioni le due procedure descritte nel §12.3.2 e nel §12.3.3 forniscono:

- procedura secondo EN 1990: $$\gamma_f = \gamma_{Rd} \cdot \gamma_m = 1.39 \quad (12.17)$$

- procedura secondo EN 1992-1-1: $$\gamma_f = \frac{\exp\left(\alpha_R \cdot \beta \cdot V_{Rf}\right)}{\mu_{Rf}} = 1.29 \quad (12.18)$$

A vantaggio di sicurezza, nelle presenti Istruzioni si assume che le verifiche a taglio allo SLU di elementi in calcestruzzo armati con staffe di FRP siano condotte adottando nel calcolo della resistenza di progetto delle staffe di FRP il fattore parziale $\gamma_f = 1.40$, leggermente conservativo rispetto al valore stimato dalla (12.17). Stante la linearità del termine di resistenza a taglio relativo al contributo delle staffe rispetto alla resistenza del materiale FRP (si veda Eq. (6.13)), tale fattore parziale può essere inteso anche come fattore parziale di modello a moltiplicare l'intero contributo resistente, al pari del fattore γ_V utilizzato per calcolare il contributo dei meccanismi resistenti a taglio del calcestruzzo, $V_{Rd,ct}$, in assenza armatura trasversale (si vedano Eq. (6.11a) e (6.11c)).

Un analogo valore del fattore parziale $\gamma_f = 1.40$ è suggerito per calcolare la resistenza di progetto delle staffe di FRP per la valutazione degli effetti del confinamento prodotti dalle staffe di FRP in elementi in calcestruzzo presso-inflessi o soggetti a prevalenti sollecitazioni di sforzo normale.
Per entrambe le sollecitazioni, si intende che il valore $\gamma_f = 1.40$ sia comprensivo di tutte le incertezze illustrate in precedenza (incertezza del modello di resistenza ed incertezze geometriche, incertezza della resistenza a trazione del materiale) e che possa essere, quindi, utilizzato senza ulteriori fattori parziali per calcolare il valore di progetto della resistenza a trazione delle staffe di FRP, a partire dal valore caratteristico associato ad una data classe di resistenza. In funzione delle condizioni di esposizione della struttura, il valore di progetto della resistenza a trazione delle staffe di FRP potrà tenere conto anche dei fattori di conversione ambientale, come indicato nella (4.4).

Bibliografia essenziale

1. EAD 260023-00-0301 (2024) *Carbon, glass, basalt and aramid fibre reinforced polymer bars as reinforcement of structural elements*. Adopted on January 2019, EOTA, OJ Publication: Decision (EU) 2024/1944.
2. EN 1990:2023 (2023) *Eurocode - Basis of structural and geotechnical design*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
3. EN 1992-1-1:2023 (2023) *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
4. Massey F.J. (1951) *The Kolmogorov–Smirnov test for goodness of fit*, J Am Stat Assoc 46(2539): 68–78.
5. *fib* Bulletin 80 (2016) *Partial factor methods for existing concrete structures*, CEB-FIP *fib*.
6. *fib* Bulletin 65 (2012) *Model Code 2010* - Final draft, Vol. 1, CEB-FIP *fib*.
7. *fib* MC 2020 (2024) *fib Model Code for concrete structures 2020*, v. 1.2, CEB-FIP *fib*.
8. Franco A., Ceroni F., Bonati A., Occhiuzzi A. (2025) 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

Fabbricante

- 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, il Fabbricante deve fornire la Dichiarazione di Prestazione e Conformità (DoPC) 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, il Fabbricante deve 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 tipologia e le caratteristiche (geometriche, meccaniche e fisiche) delle barre di FRP secondo quanto indicato in Tabella 3-1 e specificandone la classe di resistenza (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) di cui al Regolamento (UE) 2024/3130 nel caso di prodotti marcati CE (anche verificando che il Certificato di Costanza della Prestazione e di Conformità del prodotto (CCPC), rilasciato da idoneo organismo notificato, sia in corso di validità) 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 *LG-barre FRP*.
- Nel caso di prodotti qualificati mediante marcatura CE, le procedure di accettazione previste

nella *LG-barre FRP* 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 comprovata 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) 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 si può seguire per definire in maniera più accurata, mediante prove sperimentali e seguendo l'approccio *Design by Testing* suggerito in (EN 1990:2023), l'influenza dell'aderenza di specifiche barre di FRP sul calcolo delle frecce di elementi in calcestruzzo armato con barre di FRP.
Per la valutazione delle frecce si fa riferimento alla seguente formula:

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

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 (14.1), è possibile calibrare i valori del coefficiente β_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 β_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 β_2 si porrà uguale a 0.5.

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

15.1 PREMESSA

Come descritto nel Capitolo 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 τ 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 (sabbiatura, presenza di scanalature, nervature, dentellature o risalti superficiali ottenuti con differenti tecnologie di produzione).
In Figura 15-1 si riportano alcuni esempi tipici di barre di FRP presenti in commercio.

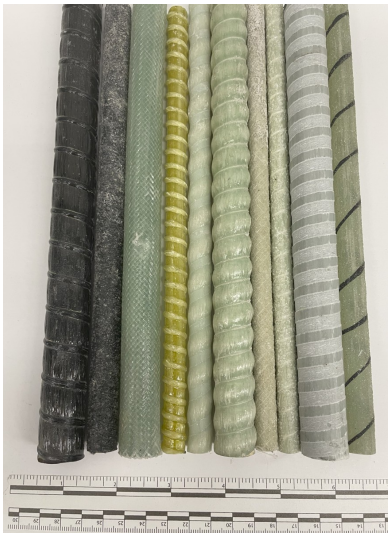


Figura 15-1 - Esempi di diverse tipologie di barre di FRP presenti sul mercato.

Il legame di aderenza può essere ottenuto per via sperimentale attraverso specifiche prove, come descritto nel §5.3, e, in funzione del tipo di trattamento superficiale delle barre, esso può assumere forme diverse ed essere caratterizzato da valori di picco della tensione tangenziale (resistenza di aderenza, τ_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*). 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 indicazioni per la modellazione del legame di aderenza delle barre di FRP sia in termini di relazione $\tau(s)$ sia di valore di picco della tensione tangenziale, τ_b, definita nel seguito come 'resistenza di aderenza'.

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 di 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 15-2a) e riproposto in (Pecce et al., 2001) senza il tratto caratterizzato dalla tensione tangenziale residua (Figura 15-2b).
Inoltre, diversamente da quanto avviene nel caso di barre di acciaio ad aderenza migliorata, per le barre di FRP, una volta raggiunto il valore di picco della tensione tangenziale, τ_b, sperimentalmente spesso non è stato osservato un chiaro tratto orizzontale (plateau) prima della fase discendente, e, pertanto, in entrambe le leggi proposte nelle Figure 15-2, dopo il valore di picco della tensione tangenziale si attiva un tratto di *softening* lineare.
Nel caso di legame di aderenza con resistenza residua (Figura 15-2a), i tre rami sono definiti come segue:

$$\tau(s) = \tau_b \cdot \left(\frac{s}{s_b}\right)^{\alpha} \qquad s \le s_b \tag{15.1}$$

$$\tau(s) = \tau_b - p\left(s - s_b\right) \qquad s_b < s \le s_r \tag{15.2}$$

$$\tau(s) = \tau_r \qquad s > s_r \tag{15.3}$$

essendo $p = \dfrac{\tau_b - \tau_r}{s_r - s_b}$ (15.4)

Nel caso di legame senza resistenza residua (Figura 15-2b), il primo ramo è dato ancora dalla (15.1), mentre il ramo di *softening* lineare è definito come:

$$\tau(s) = \tau_b - p\left(s - s_b\right) \qquad s_b < s \le s_u \tag{15.5}$$

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

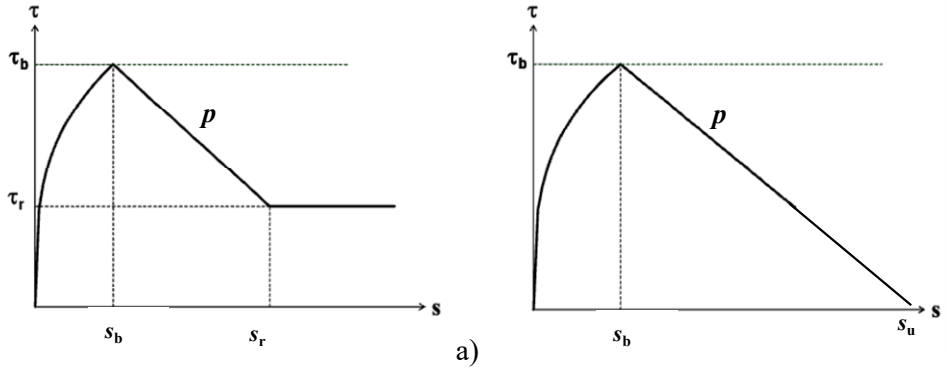


Figura 15-2 - Legame di aderenza per barre di FRP: a) legame BEP modificato con resistenza residua; b) legame BEP modificato senza resistenza residua.

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, τ_b, s_b, α, p e s_r (oppure τ_r). Nel caso del modello a due rami i parametri si riducono a quattro: τ_b, s_b, α e p.

Nel paragrafo successivo sono fornite delle indicazioni per il calcolo della resistenza di aderenza τ_b in relazione alla resistenza del calcestruzzo ed alle classi di aderenza come definite 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 pa-

rametri s_b, α 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 nei seguenti intervalli: s_b = 0.10 ÷ 0.35 mm; α = 0.45 ÷ 0.50, p = 0.01 ÷ 0.05 N/mm^3. Qualora si sviluppi anche un meccanismo di ingranamento, come evidenziato nelle prove sperimentali riportate in Figura 15-3b, si suggeriscono i seguenti intervalli: s_b = 1.5 ÷ 1.75 mm; α = 0.30 ÷ 0.45, p = 0.10 ÷ 0.20 N/mm^3.
Si osserva che, poiché $\alpha \leq 1$, per scorrimenti che tendono a zero la pendenza del primo tratto tende ad essere verticale.

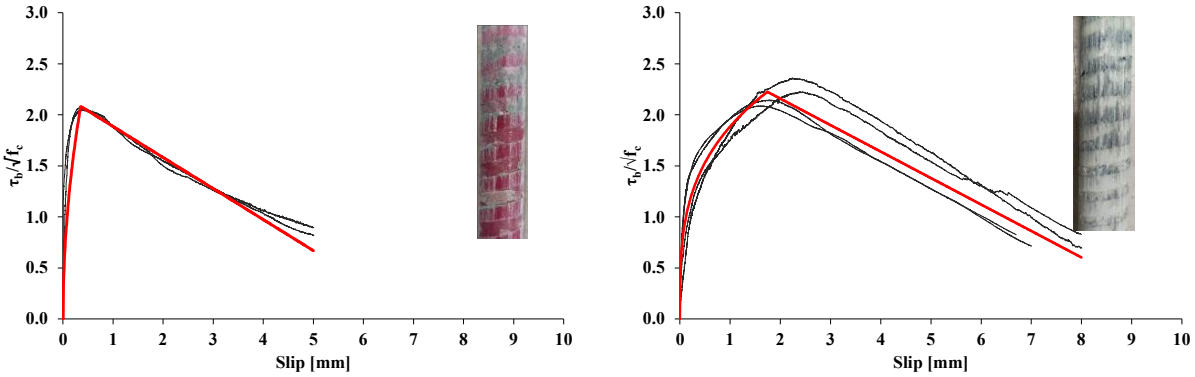
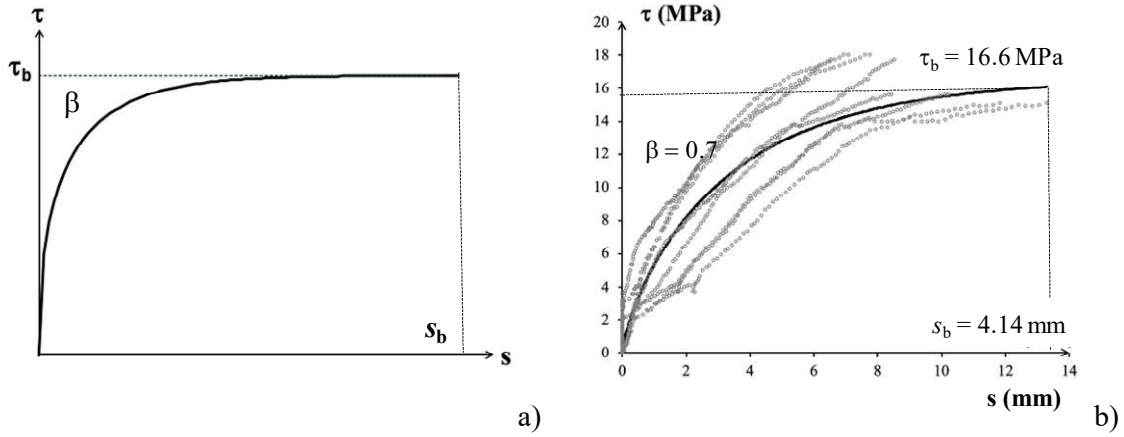


Figura 15-3 - Legami di aderenza sperimentali e teorici ottenuti dalle (15.1) e (15.5): a) legame basato principalmente su adesione chimico-fisica; b) legame basato su *interlocking*.

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 15-4a) è, infatti, il seguente:

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

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 dovuto all'adesione chimica all'interfaccia barra-calcestruzzo. I 3 parametri da determinare per la completa definizione del legame sono, quindi: τ_b, s_b, e β. Mentre per il valore di τ_b si rimanda al paragrafo successivo, per gli altri due parametri si suggeriscono i seguenti intervalli: s_b = 1.70 ÷ 5.70 mm; β = 0.37 ÷ 1.17.
In Figura 15-4b, si riportano alcuni confronti tra i tratti ascendenti di legami $\tau(s)$ sperimentali, ottenuti da prove di aderenza su barre in CFRP, e la (15.6), in cui si sono assunti τ_b = 16.6 MPa, s_b = 4.14 mm, β = 0.7 (Leone, 2005).



a) b)

Figura 15-4 - a) Tratto ascendente con andamento esponenziale del legame di aderenza dato dalla (15.6); b) confronto tra legami di aderenza sperimentali e legame teorico dato 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*, J. of Materials in Civil Engineering 1(2):40-51, 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 2nd Int. Conf. on Advanced Composites Materials in Bridge Structures, ACMBS-II, Montreal, 1996, M. El-Brady Ed.
4. Pecce M. Manfredi G., Realfonzo R., Cosenza E. (2001) *Experimental and analytical evaluation of bond properties of GFRP bars*, J. of Materials in Civil Engineering, 10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:4(282).
5. Leone M. (2005) *Interface analysis of FRP (Fiber Reinforced Polymer) reinforced concrete elements*, PhD Thesis, Department of Innovation Engineering University of Salento.
6. Focacci F., Nanni A., Bakis C.E. (2000) *Local bond-slip relationship for FRP reinforcement in concrete*, J. of Composites for Construction, 4(1):24-31, 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*, J. of Composites for Construction, 28(6): 04024055, 10.1061/JCCOF2.CCENG-4603.

15.3 VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA DI ADERENZA

La tensione di picco del legame di aderenza, ovvero la resistenza di aderenza τ_b, può essere ottenuta da prove sperimentali di aderenza su lunghezze di barra pari a 5 volte il diametro effettivo della barra, come descritto nel §5.3.

In letteratura e in diverse linee guida di progettazione sono fornite formulazioni per la stima di τ_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).

Ai fini del presente documento, sono stati esaminati i risultati di un esteso database di prove sperimentali (622 prove) di aderenza (pull-out) eseguite su barre di FRP di diverse tipologie (per trattamento superficiale, per fibre, per diametro) immerse in blocchi di calcestruzzo con resistenza f_{cm} variabile tra 22 MPa e 80 MPa e con lunghezze aderenti pari a 5 volte il diametro della barra, $d_{b,eff}$.

I risultati sono stati esaminati in termini di valori sperimentali di resistenza di aderenza calcolata come $\tau_b = \frac{F_{max}}{\pi d_{b,eff} \cdot \ell_b}$ ed ipotizzata, quindi, costante lungo la lunghezza aderente $\ell_b = 5d_{b,eff}$. I dati sperimentali sono stati separati in due sottogruppi in funzione dell'appartenenza alle due classi di aderenza definite nel §5.3; poiché tali classi fanno riferimento ad una prova di aderenza con calcestruzzo con f_{ck} = 20 MPa (ovvero f_{cm} = 28 MPa), l'assegnazione ad una delle due classi per ciascun dato è stata fatta correggendo il valore sperimentale della resistenza di aderenza, τ_b, per il rapporto $\sqrt{\frac{28}{f_{cm}}}$, essendo f_{cm} la resistenza del calcestruzzo utilizzato nella prova. Per ciascuno dei due sottogruppi, sono state, quindi, trovate le seguenti leggi di correlazione:

Classe di aderenza 1: $\tau_b = 3.3 \cdot \sqrt{f_{cm}}$ (15.7a)

Classe di aderenza 2: $\tau_b = 2.2 \cdot \sqrt{f_{cm}}$ (15.7b)

In Figura 15-5, si riportano i confronti tra i valori sperimentali di τ_b (reali, non corretti per $\sqrt{\frac{28}{f_{cm}}}$) e quelli previsti dalle (15.7), distinti per le due classi di aderenza; il confronto evidenzia che le espressioni (15.7) interpretano bene in media l'andamento dei valori sperimentali della resistenza di aderenza delle barre di FRP suddivise nelle due classi e possono essere utilizzate per studiare il comportamento locale dell'aderenza mediante modelli numerici o analitici, quando non si abbiano a disposizione dati sperimentali specifici riguardo il valore di τ_b.

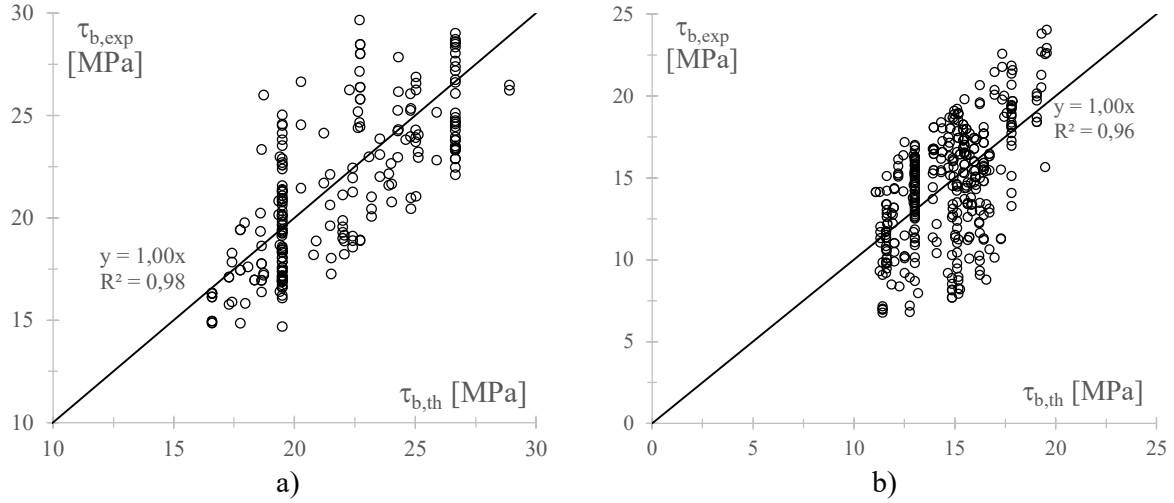


Figura 15-5 - Confronto tra valori sperimentali e teorici dati dalle (15.7) per la resistenza di aderenza τ_b: a) Classe di aderenza 1; b) Classe di aderenza 2.

In alcune formule presenti in letteratura e in codici normativi, la resistenza di aderenza dipende anche dalla lunghezza di aderenza della barra, ℓ_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 in genere sono state calibrate sulla base dei risultati di prove di aderenza su barre in FRP con diverse lunghezze di aderenza ℓ_b, anche maggiori di $5d_{b,eff}$, e calcolando la tensione tangenziale in corrispondenza del carico massimo sperimentale come rapporto tra la forza massima e la superficie aderente della barra nell'ipotesi di distribuzione costante delle tensioni tangenziali in ℓ_b. Si precisa, pertanto, che esse non sono con-

frontabili con la resistenza di aderenza, τ_b (che è un valore puntuale di tensione tangenziale da valutarsi su lunghezze ridotte, quali $\ell_b = 5d_{b,eff}$ come descritto nel §5.3), ma devono intendersi come indicazioni predittive della tensione tangenziale 'media', $\overline{\tau_b}$, agente lungo la barra in corrispondenza del carico massimo. Tali tensioni sono spesso adottate per calcolare la lunghezza di ancoraggio ℓ_a necessaria per raggiungere un fissato valore, σ_f, di tensione normale nella barra in FRP attraverso l'espressione:

$$\ell_a = \frac{A_b \cdot \sigma_f}{\pi d_{b,eff} \cdot \overline{\tau_b}} \tag{15.8}$$

Delle modalità di calcolo della lunghezza di ancoraggio adottate nelle presenti Istruzioni si tratterà in dettaglio nel successivo §15.4.

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., 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, 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., 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*, J. of Composites for Construction, 9(3), pp. 203-213.
6. Tighiouart B., Benmokrane B., 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., Tian S. (2024) *Bond of FRP bars with different surface characteristics to concrete*, Structures, 59
8. Xue W., Yang Y., Zheng Q., 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, 2023) per le armature metalliche. Per gli elementi di calcestruzzo con armature metalliche, il valore di progetto della lunghezza di ancoraggio, ℓ_a, per barre rettilinee è dato dalla seguente formulazione:

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

in cui:

- d_{ba} è il diametro della barra di acciaio;
- σ_{sd} è la tensione di progetto nella barra di acciaio;
- f_{ck} è il valore caratteristico della resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo;
- k_ℓ è un coefficiente tarato su base statistica: pari a 50 per condizioni di progetto relative ad azioni permanenti e variabili e 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, 2023) pari a 1.0 per buone condizioni

di aderenza o pari a 1.2 per scarse condizioni di 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;

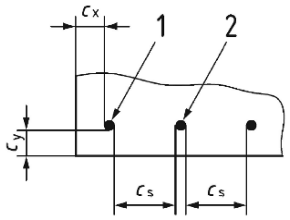


Figura 15-6 - Grandezze per la definizione di c_d

La formula (15.9) è stata ottenuta (CEN/TC 250/SC 2 N2087) mediante inversione della seguente formula di regressione della tensione σ_{sd} agente nella barra in funzione della sua lunghezza aderente ℓ_a e dei termini adimensionali $\left(\frac{f_{ck}}{25}\right), \left(\frac{25}{d_{ba}}\right), \left(\frac{c_d}{d_{ba}}\right)$:

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

Ai fini del presente documento, la (15.10) è stata ricalibrata per le due classi di aderenza definite nel § 5.3, sulla base di un esteso database di prove sperimentali (851 prove) di aderenza (pull-out) condotte su barre di FRP di diverse tipologie (per trattamento superficiale, per fibre, per diametro) immerse in elementi in calcestruzzo con resistenza f_{ck} variabile tra 15 MPa e 90 MPa. In particolare, sono stati raccolti 283 dati relativi a prove di barre di FRP ricadenti in Classe di aderenza 1 e 568 dati di barre di FRP ricadenti in Classe di aderenza 2; in entrambi i gruppi le prove sono state condotte su lunghezze di aderenza variabili (da un minimo di $2.5d_{b,eff}$ ad un massimo di $40d_{b,eff}$, essendo $d_{b,eff}$ il diametro effettivo della barra di FRP fornito dagli sperimentatori).
Poiché i dati si riferiscono a prove di aderenza in cui la barra di FRP era centrata e caratterizzata da rilevanti valori del copriferro (la crisi è stata, infatti, sempre per pull-out della barra e non per splitting del calcestruzzo), non è stato stimato il contributo del termine $\left(\frac{1.5d_{b,eff}}{c_d}\right)$.
Si è proceduto, quindi, a calibrare nella (15.10) gli esponenti dei soli termini $\left(\frac{f_{ck}}{25}\right), \left(\frac{20}{d_{b,eff}}\right), \left(\frac{\ell_a}{d_{b,eff}}\right)$, attraverso una procedura multivariata di regressione basata sul confronto tra i valori sperimentali della tensione di trazione agente nella barra di FRP, $\sigma_{f,exp}$, e corrispondente alla crisi per aderenza per un'assegnata ℓ_a, ed i valori teorici $\sigma_{f,th,m}$ (si vedano le Figure 15-7) predetti dalle espressioni sotto riportate:

- per la Classe di aderenza 1: $\tau_b > 15$ MPa:

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

- per la Classe di aderenza 2: (7 MPa $< \tau_b < 15$ MPa):

$$\sigma_{fd} = k \cdot \left(\frac{\ell_a}{d_{b,eff}} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{25} \right)^{2/5} \cdot \left(\frac{20}{d_{b,eff}} \right)^{1/5} \tag{15.12}$$

Nelle (15.11) e (15.12), i simboli hanno il significato introdotto in precedenza, a meno di k che è stato tarato sulla base del confronto con i dati sperimentali e della tensione σ_{fd} che indica il valore predetto medio, caratteristico o di progetto della tensione di trazione agente nella barra di FRP in caso di crisi per aderenza per un'assegnata ℓ_a, a secondo del valore assunto per k. Il best fitting sui dati sperimentali della tensione nella barra ha permesso, infatti, di stimare il valore medio del coefficiente k, mentre attraverso la procedura di '*design by testing*' condotta secondo le procedure indicate in (EN 1990:2023) sono stati stimati i valori frattili al 5% (valore caratteristico) e allo 0.1% (valore di progetto), come riportato in Tabella 15-1 per i due distinti dataset di dati sperimentali (barre di FRP ricadenti in Classe di aderenza 1 o 2). Si riportano in Tabella 15-1 anche il valore del coefficiente di variazione (CoV) associato alla variabile $\sigma_{f,exp} / \sigma_{f,th,m}$, la numerosità dei dati e l'intervallo di variazione della resistenza a compressione media del calcestruzzo, f_{cm}.
Infine, invertendo la (15.11) e la (15.12), si sono ottenute le seguenti espressioni della lunghezza di ancoraggio da garantire alla barra di FRP perché possa essere soggetta alla tensione di trazione σ_{fd}:

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

$$\ell_a = k_\ell \cdot d_b \cdot \left(\frac{\sigma_{fd}}{500} \right)^2 \cdot \left(\frac{25}{f_{ck}} \right)^{4/5} \cdot \left(\frac{d_{b,eff}}{20} \right)^{2/5} \qquad k_\ell = \left(\frac{500}{k} \right)^2 \tag{15.13}$$

- Per la Classe di aderenza 2: (7 MPa < τ_b < 15 MPa):

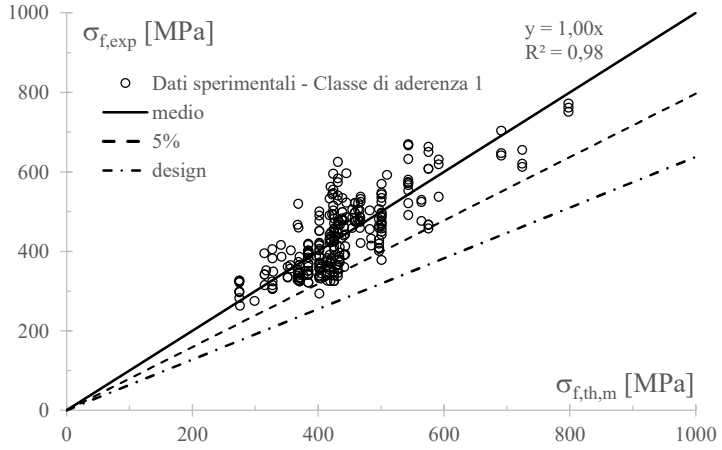
$$\ell_a = k_\ell \cdot d_b \cdot \left(\frac{\sigma_{fd}}{500} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{25}{f_{ck}} \right)^{3/5} \cdot \left(\frac{d_{b,eff}}{20} \right)^{3/10} \qquad k_\ell = \left(\frac{500}{k} \right)^{3/2} \tag{15.14}$$

Anche le (15.13) e (15.14) hanno significato di valore medio, caratteristico o di progetto in base ai valori riportati in Tabella 15-1 per il coefficiente k_ℓ.

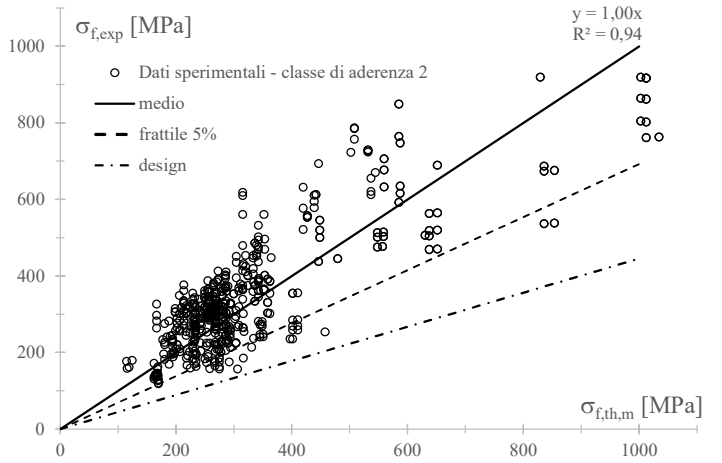
Tabella 15-1 – Valori medi, caratteristici e di progetto dei coefficienti k e k_ℓ

Classe di aderenza	k_ℓ			k			Database		
	medio	5%	design	medio	5%	design	CoV	N° dati	f_{cm} [MPa]
1	12.0	19.0	30.0	144	115	92	0.13	283	22-80
2	19.3	34.0	65.0	69.5	48	31	0.24	568	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 in corrispondenza della crisi per aderenza, $\sigma_{f,exp}$, ed i valori medi predetti, $\sigma_{f,th,m}$, per la Classe di aderenza 1 secondo la (15.11) e per la Classe di aderenza 2 secondo la (15.12). Nelle Figure 15-7 si riportano anche le rette corrispondenti ai valori caratteristici e di progetto della tensione di trazione teorica.



a)



b)

Figura 15-7 - Confronto tra valori sperimentali della tensione di trazione nelle barre di FRP in prove di aderenza e valori predetti: a) Classe di aderenza 1, Eq. (15.11); b) Classe di aderenza 2, Eq. (15.12).

Ai fini progettuali, nelle (15.11)-(15.14), si utilizzerà il diametro nominale d_b delle barre di FRP al posto di quello effettivo $d_{b,eff}$ delle barre utilizzate per la calibrazione.
Le relazioni (15.13) e (15.14) sono diagrammate in Figura 15-8a e Figura 15-8b per le barre di FRP ricadenti in Classe di aderenza 1 e 2, rispettivamente, in termini di lunghezza di ancoraggio adimensionalizzata rispetto al diametro della barra, ℓ_a/d_b, con riferimento ai valori medi (m), caratteristici (k) e di progetto (d). Le formule sono state applicate assumendo f_{ck} = 25 MPa e σ_{fd} = 490 MPa (ottenuta a titolo di esempio come $\sigma_{fd} = \frac{f_{ftk}}{\gamma_f}\eta_T \cdot \eta_a \cdot \eta_{c,l} = \frac{1000}{1.25}0.9 \cdot 0.85 \cdot 0.8 = 490$ MPa).
Nelle Figure 15-9, le stesse curve sono riportate assumendo f_{ck} = 30 MPa e σ_{fd} = 490 MPa.

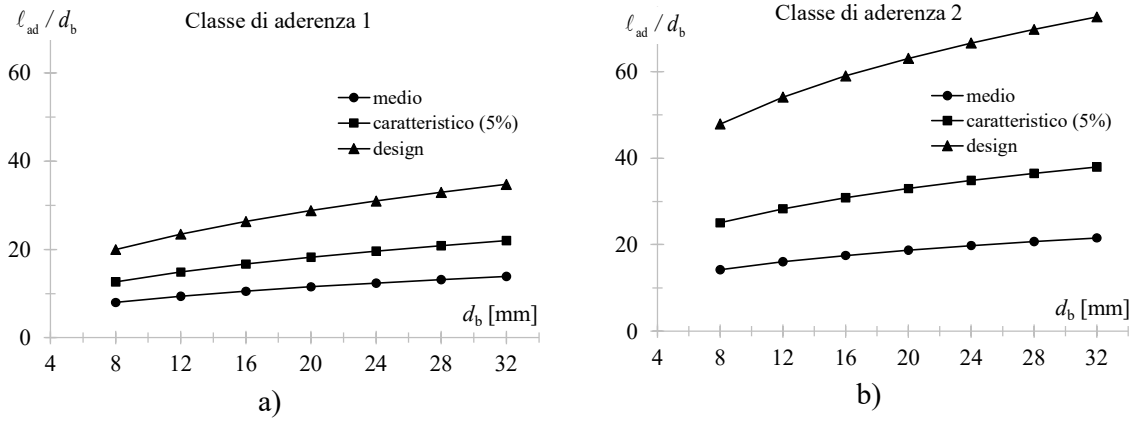


Figura 15-8 - Variazione di ℓ_a/d_b al variare del diametro della barra per f_{ck} =25 MPa e σ_{fd} = 490 MPa: a) Classe di aderenza 1, Eq. (15.13); b) Classe di aderenza 2, Eq. (15.14).

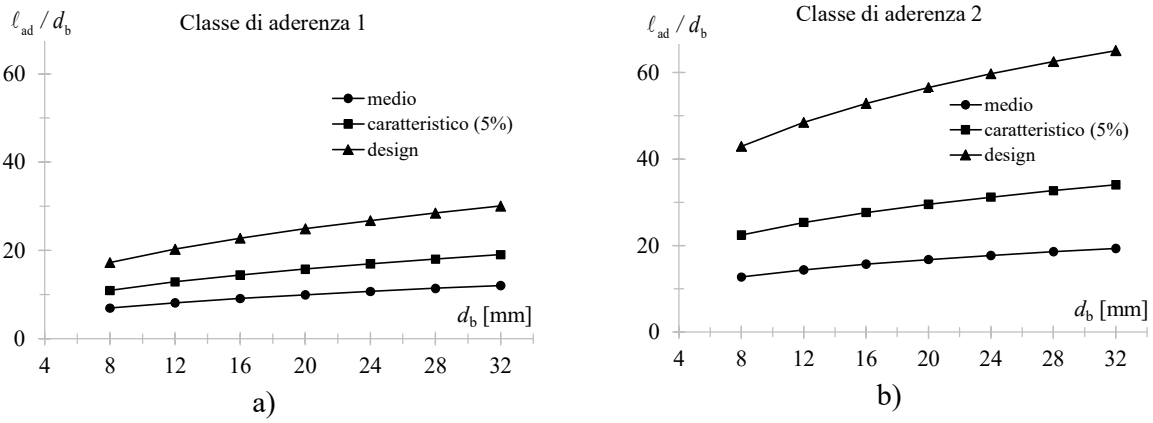


Figura 15-9 - Variazione di ℓ_a/d_b al variare del diametro della barra per f_{ck} =30 MPa e σ_{fd} = 490 MPa: a) Classe di aderenza 1, Eq. (15.13); b) Classe di aderenza 2, Eq. (15.14).

Le relazioni (5.13) e (15.14) sono diagrammate in Figura 15-10 per le barre di FRP ricadenti in Classe di aderenza 1 e 2 e per barre di acciaio, assumendo f_{ck} =30 MPa e la stessa tensione di lavoro pari a 383 MPa (440/1.15 MPa) per tutte le tipologie di barre. Si osserva che la lunghezza di ancoraggio adimensionalizzata, ℓ_a/d_b, richiesta per la barra di FRP di Classe di aderenza 2 è di poco superiore a quella della barra di acciaio, mentre la barra di FRP di Classe di aderenza 1 presenta lunghezze di ancoraggio sensibilmente minori.

Ai fini applicativi, si prevede una lunghezza di ancoraggio minima che non sia inferiore al massimo tra 300 mm e 20 d_b per qualsiasi valore del diametro e qualsiasi Classe di aderenza. In Figura 15-10, si riportano con linee tratteggiate anche i suddetti limiti in funzione del diametro della barra.

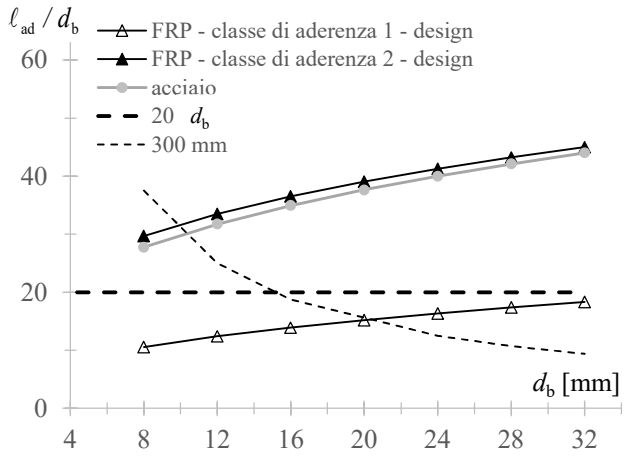


Figura 15-10 - Variazione di ℓ_a/d_b al variare del diametro della barra di FRP per la Classe di aderenza 1 (Eq. 15.13) e la Classe di aderenza 2 (Eq. 15.14) e per barre di acciaio (Eq. 15.9) per f_{ck} =30 MPa ed una tensione di lavoro pari 383 MPa.

Le (15.13) 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 a causa di un copriferro sufficientemente elevato. Ai fini progettuali, è possibile tenere in conto l'effetto dello spessore del copriferro nelle formulazioni (15.13) e (15.14) 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, 2023), purché esso risulti > 1.
Infine, è possibile introdurre nelle (15.13) e (15.14) anche il termine k_{cp} che tiene conto dell'effetto della posizione della barra nel getto sul meccanismo di aderenza, analogamente a quanto indicato in (EN 1992-1-1, 2023) per le barre di acciaio (1.0 o 1.2 per buone o scarse condizioni di aderenza).

Bibliografia essenziale

1. CEN/TC 250/SC 2 N2087 (2023) *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*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
2. EN 1990:2023 (2023) *Eurocode 0 - Basis of structural and geotechnical design*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
3. EN 1992-1-1:2023 (2023) *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

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 di progetto N_{Ed}, può variare a causa delle azioni di vincolo. Adottando l'analisi per singoli elementi secondo EN 1992-1-2, nel caso di elementi inflessi si può assumere $N_{Ed}=0$.

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'EN 1992-1-2 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:

(a) calcestruzzo a temperatura inferiore a 500 °C (con proprietà meccaniche uguali a quelle a 20 °C)

(b) 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 EN 1992-1-2 e applicabile anche a 20 °C in condizioni di incendio, differisce dalla legge usuale a temperatura normale poiché ha un ramo di softening lineare dopo il picco di resistenza (Figura 16-1).

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 ISO 834 (EN 1363-1, 2020) e alle proprietà termiche del calcestruzzo suggerite dagli Eurocodici.

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

$$\begin{aligned} &t \le 30\,\text{min} : \mathrm{T}(t,c) = \mathrm{A}_1(c)\cdot t + 20 \qquad [°\mathrm{C}] \\ &t > 30\,\text{min} : \mathrm{T}(t,c) = \mathrm{A}_2(c)\cdot t + \mathrm{A}_3(c)\cdot t^{\mathrm{A}_4(c)} \qquad [°\mathrm{C}] \end{aligned} \tag{16.1}$$

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
20	11.538	-4586.1	4221.2	0.0470
30	8.032	-2326.8	1935.7	0.0854
40	5.685	-892.3	592.2	0.1774
50	3.997	-509.4	271.7	0.2561
60	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 ε_{cu}^{*} (Campo di rottura 1);
- raggiungimento della deformazione massima a compressione nel calcestruzzo, ε_{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:

$$\varepsilon_{tot,f} = \varepsilon_{fu,T} + \varepsilon_{T,f} \tag{16.2}$$

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 16-1), è necessario limitare la deformazione massima del calcestruzzo, ε_{cu}^{*}, a un valore nominale di deformazione.

Figura 16-1 - Legge costitutiva del calcestruzzo a 20 °C in condizioni di incendio (EN 1992-1-2)

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

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

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:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}^{*} \tag{16.4}$$

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

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

$$N_c - N_f = 0 \tag{16.6}$$

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 ψ e λ per la legge costitutiva del calcestruzzo a 20 °C in condizioni di incendio (Figura 16-2) 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 può essere scritto come:

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

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

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

dove $\rho_f(T)$ è il fattore di riduzione della resistenza alla temperatura T raggiunta dalla barra al tempo *t*, fornito dal Fabbricante secondo quanto indicato al punto (1) del §6.2, per tener conto della riduzione di resistenza rispetto alla resistenza a trazione in condizioni ordinarie, f_{ftd}.
Per il Campo 2 (rottura del calcestruzzo) l'equilibrio alla traslazione può essere scritto come:

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

mentre l'equilibrio alla rotazione può essere scritto come:

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

dove $\rho_E(T)$ è il fattore di riduzione del modulo elastico alla temperatura T raggiunta dalla barra al tempo *t*, fornito dal Fabbricante secondo quanto indicato al punto (1) del §6.2, per tener conto della riduzione di rigidezza delle barre di FRP alle alte temperature e gli altri simboli hanno il significato già introdotto in precedenza.
In generale, i coefficienti adimensionali ψ e λ dipendono dal valore di ε^*_{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 ψ = 0.75 e λ=0.50.
Per consentire di raggiungere la massima resistenza flessionale dell'elemento armato con barre di FRP sopra calcolata, è necessario un adeguato ancoraggio delle barre. In condizioni di incendio, la lunghezza di ancoraggio delle barre FRP al tempo *t*, $\ell_{ad,fi,t}$ 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%.
Nelle zone dove la barra ha una temperatura superiore a 50 °C, la lunghezza di aderenza in zona protetta, $\ell_{ad,fi,t,T>50°C}$, che va aggiunta a quella data dalle (5.2) (si veda Figura 16-3), può essere determinata come segue:

$$\ell_{ad,fi,t,T>50°C} = B_1(c) + B_2(c) \cdot t^{-B_3(c)} \quad [°C] \tag{16.15}$$

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 16-2. La (16.15) è stata ottenuta interpolando i risultati delle analisi termiche riportate in (Nigro et al., 2012a).

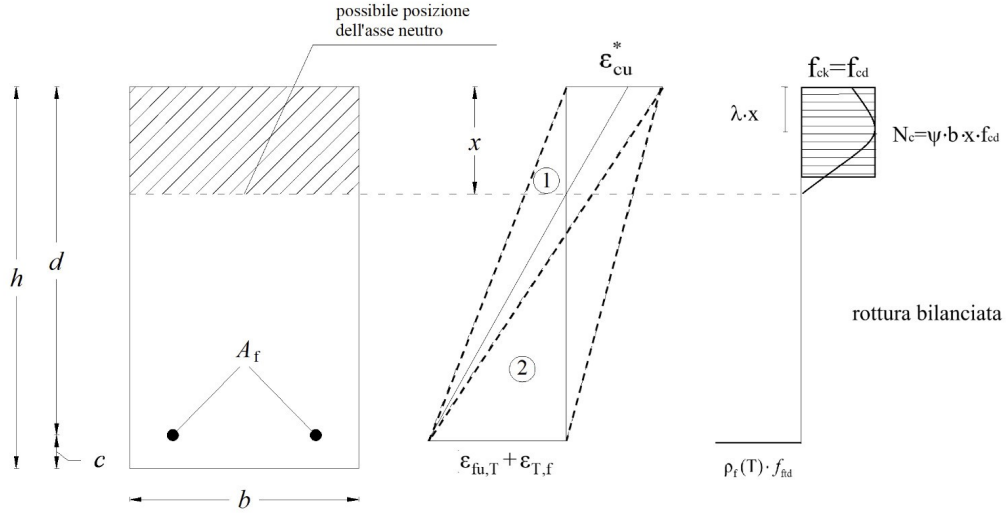


Figura 16-2 - Deformazioni e sollecitazioni allo stato limite ultimo (SLU).

La somma della lunghezza di ancoraggio efficace $\ell_{ad,fi,t}$ e della lunghezza non efficace, $\ell_{ad,fi,t,T>50°C}$, fornisce la lunghezza totale $\ell_{ad,tot}$ della zona che non deve essere esposta direttamente all'azione incendio per garantire il corretto ancoraggio delle barre (si vedano le Figure 16-3 e 16-4).

Tabella 16-2 - 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 16-3. Soletta esposta all'azione del fuoco con ancoraggio dell'armatura nelle travi in calcestruzzo.

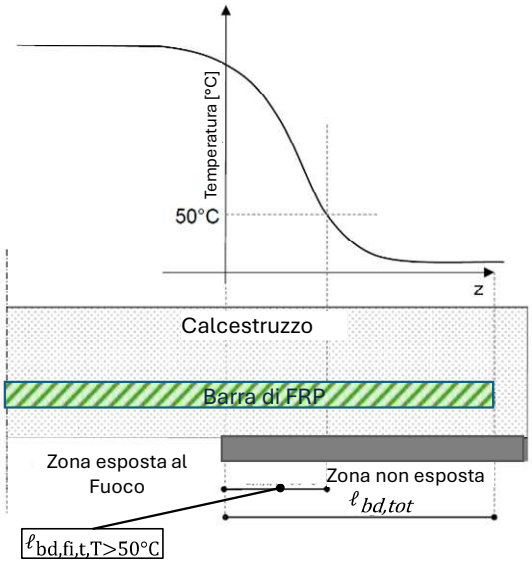


Figura 16-4 - Lunghezza di ancoraggio di barre in FRP in una zona non esposta.

Bibliografia essenziale

1. Nigro E., Cefarelli G., Bilotta A., Manfredi G., Cosenza E. (2011) *Fire resistance of concrete slabs reinforced with FRP bars. Part I: experimental investigations on the mechanical behavior*, Composites: Part B, Engineering, 42, pp. 1739-1750, ISSN: 1359-8368

2. Nigro E., Cefarelli G., Bilotta A., Manfredi G., Cosenza E. (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, 42, pp. 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, 16, pp. 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, pp. 103-112, ISSN: 1359-8368.

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 DI CALCESTRUZZO ARMATE 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 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 E45/850, caratterizzate quindi da una resistenza a trazione caratteristica f_{ftk0} = 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 2 (ambiente esterno secco) in cui l'elemento è direttamente esposto a irraggiamento solare.

17.1.2 Verifiche allo SLU

Per la combinazione di carico allo SLU, la tensione nelle barre di FRP deve essere inferiore al valore:

$$f_{ftd} = \eta_T \cdot \eta_a \cdot \eta_{c,l} \frac{f_{ftk0}}{\gamma_f}$$

con f_{ftk0} = 850 MPa, η_a = 0.85 e η_T = 0.9, γ_f =1.25.

Il coefficiente riduttivo per tener conto degli effetti di viscosità nelle barre indotti da uno stato tensionale persistente si calcola come (si veda Eq. (4.4)):

$$\eta_{c,l} = 1 - (1 - \eta_c) \cdot \frac{\sigma_{f,qp}}{f_{ftk,c}}$$

in cui si assume per barre di vetro $\eta_c = 0.50$ (Tabella 4-2) e, quindi, $f_{ftk,c} = \eta_c \cdot f_{ftk0} = 0.50 \cdot 850 = 425$ MPa e $\sigma_{f,qp}$ 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:

$$q_{d,qp} = g_1 + g_2 + 0.3 q_k = 17.35 \text{ kN /m.}$$

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 $M_{cr} = \frac{b \cdot h^2}{6} f_{ctm} = 52.14$ kN m.

Ipotizzando di utilizzare 4 barre con d_b = 14 mm ($A_f = 615$ mm^2), la tensione $\sigma_{f,qp}$ si può, quindi, calcolare in maniera semplificata come:

$$\sigma_{f,qp} = \frac{M_{max,qp}}{0.9 A_f \cdot d} = \frac{54.22 \cdot 10^6}{0.9 \cdot 615 \cdot 560} = 175 \text{ MPa.}$$

Pertanto, risulta $\eta_{c,l} = 1 - (1 - 0.5) \cdot \frac{175}{0.5 \cdot 850} = 0.79$.

La resistenza di progetto nelle barre di FRP risulta, quindi:

$$f_{ftd} = 0.85 \cdot 0.9 \cdot 0.79 \cdot \frac{850}{1.25} = 413 \text{ MPa.}$$

Il carico distribuito di progetto agente sulla trave in combinazione SLU è pari a:

$$q_{d,SLU} = 1.3 g_1 + 1.5 g_2 + 1.5 q_k = 39.6 \text{ kN /m}$$

cui corrisponde un momento massimo sollecitante $M_{Ed} = 123.6$ 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:

$$\psi f_{cd} \cdot b \cdot x = A_f \cdot f_{ftd} \rightarrow x = \frac{A_f \cdot f_{ftd}}{\psi f_{cd} \cdot b} = 84 \text{ mm}$$

avendo trovato per via iterativa ψ = 0.593 sulla base delle seguenti relazioni (si veda Eq. (6.8) in cui $\overline{\varepsilon_c} = 1000 \varepsilon_c$):

$$\psi = \begin{cases} \overline{\varepsilon_c}\left(0.5 - \dfrac{\overline{\varepsilon_c}}{12}\right) & \text{per } \overline{\varepsilon_c} \le 2.0 \\ 1 - \dfrac{2}{3\overline{\varepsilon_c}} & \text{per } 2.0 \le \overline{\varepsilon_c} \le 3.5 \end{cases} \tag{6.8}$$

ed essendo:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{ftd} \cdot \frac{x}{(d-x)} = \frac{413}{45000} \cdot \frac{84}{(560-84)} = 0.0016 < 0.0020.$$

Dall'equilibrio alla rotazione si ottiene il seguente momento resistente:

$$M_{Rd} = \psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (0.5h - \lambda \cdot x) + A_f \cdot f_{ftd} \cdot (0.5h - c) = 134.7 \text{ kN m} > M_{Ed} = 123.6 \text{ kN m}$$

in cui $\lambda = 0.364$ è stato calcolato sulla base delle seguenti relazioni (si veda Eq. (6.10) in cui $\overline{\varepsilon_c} = 1000\varepsilon_c$):

$$\lambda = \begin{cases} \dfrac{8 - \overline{\varepsilon_c}}{4\left(6 - \overline{\varepsilon_c}\right)} & \text{per } \overline{\varepsilon_c} \le 2.0 \\ \dfrac{\varepsilon_c\left(3\overline{\varepsilon_c} - 4\right) + 2}{2\overline{\varepsilon_c}\left(3\overline{\varepsilon_c} - 2\right)} & \text{per } 2.0 \le \overline{\varepsilon_c} \le 3.5 \end{cases} \tag{6.10}$$

La verifica risulta, quindi, soddisfatta; 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).
L'armatura prevista in trazione (4 barre con d_b = 14 mm, $A_f = 615$ mm^2) è superiore al valore minimo dato dalla seguente formula:

$$A_{f,min} = 0.34 \cdot \frac{b \cdot d \cdot f_{ctm}}{f_{ftd}} = 0.34 \cdot \frac{300 \cdot 560 \cdot 2.9}{413} = 401 \text{ mm}^2.$$

Calcolo della lunghezza di ancoraggio

Si procede al calcolo della lunghezza di ancoraggio, assumendo la tensione di lavoro nelle barre in FRP, σ_{fd}, pari alla resistenza a trazione di progetto delle barre, f_{ftd} = 413 MPa.

In caso di barre con classe 1 di aderenza, assumendo k_{cp} =1 e trascurando il termine $\left(\dfrac{1.5d_b}{c_d}\right)^{1/2}$ in quanto minore dell'unità, si ha (secondo Eq. (5.2a)):

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

$$\ell_a = 30 \cdot 14 \cdot \left(\frac{413}{500}\right)^2 \cdot \left(\frac{25}{30}\right)^{4/5} \cdot \left(\frac{14}{20}\right)^{2/5} = 215 \text{ mm } (\approx 15\, d_b)$$

In caso di barre con classe 2 di aderenza, 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 secondo la (5.2b):

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

$$\ell_a = 65 \cdot 14 \cdot \left(\frac{413}{500}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{25}{30}\right)^{3/5} \cdot \left(\frac{14}{20}\right)^{3/10} = 550 \text{ mm} = (\approx 39\ d_b)$$

Per barre di FRP di Classe di aderenza 1, il valore calcolato della lunghezza di ancoraggio (215 mm) è inferiore al limite minimo di 300 mm e di 20 d_b = 280 mm e, pertanto, si adotta una lunghezza di ancoraggio di progetto $\ell_{ad} = 300$ mm.

Per barre di FRP di Classe di aderenza 2, il valore calcolato della lunghezza di ancoraggio (550 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 $\ell_{ad} = 550$ mm.

Avendo ipotizzato la condizione di esposizione 2, non è necessario tener conto del fattore di conversione ambientale.

Si osserva che essendo il momento resistente calcolato con 4 barre con d_b = 14 mm superiore di circa il 10% rispetto al momento sollecitante di progetto, per ridurre la lunghezza di ancoraggio nel caso di barre di FRP con Classe di aderenza 2, è possibile calcolare la tensione di lavoro delle barre in funzione della lunghezza di ancoraggio adottata tramite Eq. (5.5b) ed inserendo tale valore nelle equazioni di equilibrio alla traslazione e rotazione.

17.1.3 Verifiche allo SLE

17.1.3.1 Verifiche tensionali

Per la combinazione di carico quasi permanente, la tensione nelle barre di FRP deve soddisfare la seguente limitazione (secondo Eq. (7.2)):

$$\sigma_f \le \eta_T \cdot \eta_a \cdot \eta_c \cdot \frac{f_{ftk0}}{\gamma_f} = 325 \text{ MPa}$$

essendo f_{ftk0} = 850 MPa, $\eta_T = 0.90$, $\eta_a = 0.85$, $\eta_c = 0.50$, γ_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 $M_{cr} = \frac{b \cdot h^2}{6} f_{ctm} = 52.14$ 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 (§ 7.2) $E_{c,eff} = \frac{E_c}{1+\varphi(t,t_0)} = \frac{32837}{1+2} = 10946$ MPa avendo assunto il coefficiente di viscosità $\varphi(t,t_0) = 2$.

Si considerano le 4 barre con d_b = 14 mm ($A_f = 615$ mm^2) definite sulla base della verifica allo SLU e la tensione nelle barre di FRP si calcola come segue, considerando un comportamento elastico lineare per i materiali (secondo Eq. (7.4)):

$$\sigma_f = \alpha_f \cdot \frac{M_{max,qp}}{I_2} \cdot (d - x_2)$$

in cui:

- $\alpha_f = \frac{E_f}{E_{c,eff}} = \frac{45000}{10946} = 4.1$ 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 α_f. L'asse neutro si calcola attraverso l'annullamento del momento statico della sezione fessurata omogeneizzata al calcestruzzo:

$$S_n = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{b \cdot x_2^{\,2}}{2} - \alpha_f \cdot A_f \cdot (d - x_2) = 0 \quad \rightarrow x_2 = 89.1 \text{ mm}$$

L'inerzia della sezione si calcola, quindi, come:

$$I_2 = \frac{b \cdot x_2^{\,3}}{3} + \alpha_f \times A_f \cdot (d - x_2)^2 = 631.8 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

La tensione nelle barre di FRP è, quindi, pari a:

$$\sigma_f = \alpha_f \cdot \frac{M_{max,qp}}{I_2} \cdot (d - x_2) = 4.1 \cdot \frac{54.22 \cdot 10^6}{631.8 \cdot 10^6} \cdot (560 - 89.1) = 166 \text{ MPa} < 325 \text{ MPa}.$$

Le tensioni nel calcestruzzo vanno inoltre limitate come segue in accordo con quanto prescritto nella Normativa vigente:

$$\sigma_c = \frac{M_{max,qp}}{I_2} \cdot x_2 = \frac{54.22 \cdot 10^6}{631.8 \cdot 10^6} \cdot 89.1 = 7.6 \text{ MPa} < 0.45\, f_{ck} = 13.5 \text{ MPa}.$$

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 mm ($A_f = 462$ mm^2), si ottiene $\sigma_f = 220$ MPa < 325 MPa e $\sigma_c = 8.7$ MPa < 13.5 MPa.

Per la combinazione di carico caratteristica (rara), la tensione nelle barre di FRP deve soddisfare la seguente limitazione (secondo Eq. (7.1)):

$$\sigma_f \le \eta_T \cdot \eta_a \cdot 0.8 \cdot \frac{f_{ftk0}}{\gamma_f} = 520 \text{ MPa}$$

essendo f_{fk} = 850 MPa, $\eta_a = 0.85$, $\eta_T = 0.9$, $\gamma_f = 1.0$.

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 4 barre con d_b = 14 mm ($A_f = 615$ mm^2) definite in base alla verifica allo SLU ed adottando $\alpha_f = 1.37$, si ottiene:

- x_2 = 53.4 mm, $I_2 = 231.7 \cdot 10^6$ mm^4,
- $\sigma_f = \alpha_f \cdot \frac{M_{max,rara}}{I_2} \cdot (d - x_2) = 1.37 \cdot \frac{85.94 \cdot 10^6}{231.7 \cdot 10^6} \cdot (560 - 53.4) = 257.5$ MPa < 520 MPa.
- $\sigma_c = \frac{M_{max,rara}}{I_2} \cdot x_2 = \frac{85.94 \cdot 10^6}{231.7 \cdot 10^6} 53.4 = 19.8$ MPa > 0.60 f_{ck} = 18.0 MPa

La verifica riguardante la tensione massima del calcestruzzo non è pertanto soddisfatta. E' necessario, quindi, incrementare il numero di barre di FRP che diventano 5 con d_b = 14 mm. Si osserva, invece, che per soddisfare la limitazione tensionale nelle barre di FRP, sarebbero sufficienti solo 2 barre con d_b = 14 mm (σ_f = = 510 MPa < 520 MPa).

17.1.3.2 Controllo dell'ampiezza delle fessure

Per la combinazione di carico 'quasi permanente' in condizioni di esposizione 2, l'apertura massima delle fessure (Eq. (7.6)) deve rispettare la seguente limitazione:

$$w_k = k_{1/r} \cdot s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm}) \le 0.6 \text{ mm}$$

Si assume lo stesso coefficiente di omogeneizzazione adottando in precedenza per le verifiche tensionali in combinazione di carico quasi-permanente, $\alpha_f = \frac{E_f}{E_{c,eff}} = \frac{45000}{10946} = 4.11$, ottenuto assumen-

do $\varphi(t,t_0)=2$.

Si ipotizza di utilizzare 5 barre con d_b = 14 mm ($A_f = 769.3$ mm^2), secondo quanto richiesto dalla verifica delle tensioni in combinazione rara.

L'asse neutro e l'inerzia della sezione fessurata omogeneizzata si calcolano con le formule viste in precedenza e risultano:

$x_2 = 98.6$ mm, $I_2 = 772.1\cdot10^6$ mm^4

Si ottiene, quindi, $k_{1/r} = \dfrac{h-x_2}{d-x_2} = \dfrac{600-98.6}{560-98.6} = 1.087$.

Si procede al calcolo della distanza massima tra le fessure, $s_{r,max}$, secondo la (7.7):

$$s_{r,max} = \beta_w \cdot \left(k_c \cdot c_{geom} + k_{\phi/r} \cdot k_{fl} \cdot k_b \frac{f_{ctm} \cdot d_b}{\tau_{mf} \cdot \rho_{l,ef}} \right)$$

essendo:

- $\beta_w = 1.7$;
- $k_c = 1.5$;
- $c_{geom} = c - 0.5 d_b = 40 - 7 = 33$ mm, essendo c_{geom} la distanza, valutata al netto del diametro, delle barre di FRP dal bordo inferiore della sezione in calcestruzzo;
- $k_{\phi/r} = 0.25$;
- $k_{fl} = \dfrac{h-h_{c,ef}}{h}$, essendo $h_{c,ef}$ l'altezza dell'area di calcestruzzo efficace in trazione definita come segue (si veda Eq. (7.11)):

$$h_{c,ef} = \min\{c+5d_b; 10d_b; 3.5c; h-x_2; h/2\} = \min\{40+5\cdot14; 140; 3.5\cdot40; 600-99; 300\} = 110 \text{ mm}$$

da cui si ottiene $k_{fl} = \dfrac{h-h_{c,ef}}{h} = \dfrac{600-110}{600} = 0.82$.

- $k_b = 0.9$ in caso di barre posizionate in basso durante il getto.
- $\tau_{mf} = 1.25 \cdot f_{ctm}$ per barre di FRP di Classe di aderenza 2 o $\tau_{mf} = 1.50 \cdot f_{ctm}$ per barre di FRP di Classe di aderenza 1.
- $\rho_{l,ef} = \dfrac{A_f}{A_{c,ef}} = \dfrac{A_f}{b \cdot h_{c,ef}} = \dfrac{769.3}{300\cdot110} = 0.0233$

Si ottiene, pertanto:

$s_{r,max} = 209$ mm per barre in Classe di aderenza 1,

$s_{r,max} = 234$ 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:

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

La tensione nelle barre di FRP corrispondente alla combinazione di carico quasi permanente si calcola come segue:

$$\sigma_f = \alpha_f \cdot \frac{M_{max,qp}}{I_2} \cdot (d - x_2) = 4.11 \cdot \frac{54.20 \cdot 10^6}{769.2 \cdot 10^6} \cdot (560 - 99) = 133.2 \text{ MPa}$$

avendo già calcolato in precedenza il momento $M_{max,qp} = 54.20$ 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:

$$\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm} = 0.00182 \geq 0.6 \frac{\sigma_f}{E_f} = 0.00178$$

L'ampiezza massima delle fessure risulta:

- per barre di FRP con Classe di aderenza 1:

  $w_k = 1.087 \cdot 209 \cdot 0.00182 = 0.414 \text{ mm} < 0.60 \text{ mm}$

- per barre di FRP con Classe di aderenza 2:

  $w_k = 1.087 \cdot 234 \cdot 0.00182 = 0.463 \text{ mm} < 0.60 \text{ mm}$

La verifica risulta quindi soddisfatta con 5 barre con $d_b = 14$ mm per entrambe le classi di aderenza. In caso di barre di FRP con Classe di aderenza 1 sono sufficienti anche 4 barre con $d_b = 14$ mm ($w_k = 1.085 \cdot 240 \cdot 0.00228 = 0.594 \text{ mm} < 0.60 \text{ mm}$).

Per la combinazione di carico frequente, l'apertura massima delle fessure deve rispettare la seguente limitazione (Eq. (7.6) e Tabella 7-1):

$$w_k = k_{1/r} \cdot s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm}) \leq 0.7 \text{ mm}$$

Si assume per questa combinazione di carico $\varphi(t, t_0) = 1$, che corrisponde ad una verifica delle ten-

sioni in una condizione temporale intermedia tra $t = 0$ e $t = \infty$ (nelle usuali verifiche degli elementi di calcestruzzo armati con barre di acciaio, assumere $\varphi(t,t_0) = 1$ corrisponderebbe ad avere il coefficiente di omogeneizzazione barre-calcestruzzo pari a 15).

Si calcola, quindi, $\mathrm{E_{c,eff}} = \dfrac{\mathrm{E}_c}{1+\varphi(t,t_0)} = \dfrac{32837}{2} = 16418$ e $\alpha_\mathrm{f} = \dfrac{\mathrm{E_f}}{\mathrm{E_{c,eff}}} = \dfrac{45000}{16418} = 2.74$.

Si assume di utilizzare 5 barre con d_b = 14 mm ($A_f = 769.3$ mm^2) come richiesto dalle verifiche precedenti. Utilizzando $\alpha_\mathrm{f} = 2.74$, la posizione dell'asse neutro e l'inerzia della sezione fessurata omogeneizzata si calcolano con le formule viste in precedenza e si ottiene:
$x = 82$ mm, $\mathrm{I_2} = 536.9 \cdot 10^6$ mm^4.

$$k_{1/\mathrm{r}} = \frac{h - x_2}{d - x_2} = \frac{600 - 82}{560 - 82} = 1.08$$

Adottando le stesse assunzioni fatte in precedenza (β_w = 1.7, k_c = 1.5, $c_{\mathrm{geom}} = 33$ mm, $k_{\phi/\mathrm{r}}$ = 0.25; $k_\mathrm{fl} = \dfrac{h - h_{\mathrm{c,ef}}}{h}$ = 0.82, $h_{\mathrm{c,ef}}$ = 110 mm, k_b = 0.9, $\rho_{\mathrm{l,ef}} = 0.023$, $\tau_{\mathrm{mf}} = 1.5 \cdot f_{\mathrm{ctm}}$ o $\tau_{\mathrm{mf}} = 1.25 \cdot f_{\mathrm{ctm}}$ per Classe di aderenza 1 o 2, rispettivamente), si ottengono gli stessi valori della distanza massima tra le fessure calcolati per la combinazione quasi-permanente:

$s_{\mathrm{r,max}} = 209$ mm per Classe di aderenza 1,

$s_{\mathrm{r,max}} = 234$ mm per Classe di aderenza 2,

La tensione nelle barre di FRP corrispondente alla combinazione di carico frequente si calcola come segue:

$$\sigma_\mathrm{f} = \alpha_\mathrm{f} \cdot \frac{\mathrm{M_{max,fr}}}{\mathrm{I_2}} \cdot (d - x_2) = 2.74 \cdot \frac{63.3 \cdot 10^6}{536.9 \cdot 10^6} \cdot (560 - 82) = 154.4 \text{ MPa}$$

Essendo il momento $\mathrm{M_{max,fr}} = \dfrac{q_{\mathrm{d,fr}} \cdot \mathrm{L}^2}{8} = \dfrac{20.0 \cdot 5^2}{8} = 63.3$ kN m e $q_{\mathrm{d,fr}} = g_1 + g_2 + 0.5 q_\mathrm{k} = 20.25$ kN/m.

Si assume, inoltre:

- k_t = 0.4 per carichi di lunga durata o per carichi ripetuti,
- f_{ctm} = 2.9 MPa,
- $\mathrm{E_c}$ = = 32837 MPa,
- $\mathrm{E_f}$ = = 45000 MPa,

ottenendo, quindi:

$$\varepsilon_{\mathrm{fm}} - \varepsilon_{\mathrm{cm}} = 0.00292 \geq 0.6 \frac{\sigma_\mathrm{f}}{\mathrm{E_f}} = 0.00206$$

L'ampiezza massima delle fessure risulta:

- per barre di FRP con Classe di aderenza 1:

$w_k = 1.084 \cdot 209 \cdot 0.00292 = 0.52$ mm < 0.7 mm

- per barre di FRP con Classe di aderenza 2:

$w_k = 1.084 \cdot 234 \cdot 0.00292 = 0.58$ mm < 0.7 mm

17.1.3.3 Verifica di deformabilità

Si effettua la verifica per la combinazione di carico caratteristica (rara), ipotizzando di utilizzare 5 barre con d_b = 14 mm ($A_f = 769.3$ mm^2), come definite dalle verifiche precedenti, 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 $\alpha_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{45000}{32837} = 1.37$. Per tale valore di α_f e per $A_f = 769.3$ mm^2, l'asse neutro e l'inerzia rispetto 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^4. Si può procedere al calcolo della freccia f_2 nell'ipotesi di sezione fessurata e parzializzata:

$$f_2 = \frac{5}{384} \frac{q_{d,rara} \cdot L^4}{E_c \cdot I_2} = \frac{5}{384} \frac{27.5 \cdot 5000^4}{32837 \cdot 285.2 \cdot 10^6} = 23.90 \text{ mm}$$

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 α_f=1.37 e $A_f = 769.3$ mm^2:

$$x_1 = \frac{0.5b \cdot h^2 + \alpha_f \cdot A_f \cdot d}{b \cdot h + \alpha_f \cdot A_f} = 301.5 \text{ mm}$$

$$I_1 = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot (0.5h - x_1)^2 + \alpha_f \cdot A_f \cdot (d - x_1)^2 = 5470.9 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

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 (secondo Eq. (7.5)):

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

$$\gamma = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^2$$

- β_1 = 0.85 per barre con Classe di aderenza 1 e 0.7 per barre con Classe di aderenza 2.

- β_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 (4) 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 $M_{cr} = \frac{b \cdot h^2}{6} f_{ctm} = 52.14$ kN m (si osserva che il calcolo esatto del momento tenendo conto del contributo delle barre di FRP ed utilizzando i valori di x_1 e I_1 precedentemente calcolati, fornisce $M_{cr} = \frac{f_{ctm} \cdot I_1}{(h - x_1)} = 53.10$ 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 $f_{ctm,fl} = \max\left\{ \left(1.6 - \frac{h}{1000} \right) \cdot f_{ctm}; f_{ctm} \right\}$, che nel caso in esame coincide con f_{ctm} = 2.9 MPa.

Si ottiene pertanto:

- per barre di Classe di aderenza 1:

$$\gamma = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^2 = 1 - 1.0 \cdot 0.85 \cdot \left(\frac{52.14}{85.94} \right)^2 = 0.69$$

$$f = f_1 \cdot (1-\gamma) + f_2 \cdot \gamma = 1.25 \cdot 0.31 + 23.9 \cdot 0.69 = 16.8 \text{ mm} \rightarrow \frac{f}{L} = \frac{16.8}{5000} = 0.0034 < \frac{1}{250} = 0.004$$

- per barre di Classe di aderenza 2:

$$\gamma = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^2 = 1 - 1.0 \cdot 0.7 \cdot \left(\frac{52.14}{85.94} \right)^2 = 0.74$$

$$f = f_1 \cdot (1-\gamma) + f_2 \cdot \gamma = 1.25 \cdot 0.26 + 23.9 \cdot 0.74 = 18.1 \text{ mm} \rightarrow \frac{f}{L} = \frac{18.1}{5000} = 0.0036 < \frac{1}{250} = 0.004$$

La verifica di deformabilità condotta per la combinazione di carico quasi permanente condotta ipotizzando di utilizzare 5 barre con d_b = 14 mm ($A_f = 769.3$ mm^2), come definite dalle verifiche precedenti, 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 mm ($A_f = 615.4$ mm^2). Il momento massimo corrispondente a tale combinazione è già stato calcolato in precedenza, $M_{max,qp} = \frac{q_{d,qp} \cdot L^2}{8} = \frac{17.35 \cdot 5^2}{8} = 54.2$ kN m.

In combinazione quasi permanente, si utilizza il modulo elastico del calcestruzzo efficace, $E_{c,eff} = \frac{E_c}{1+\varphi(t,t_0)} = \frac{32837}{3} = 10946$ MPa avendo assunto il coefficiente di viscosità $\varphi(t,t_0) = 2$. Si utilizza, quindi, $\alpha_f = \frac{E_f}{E_{c,eff}} = \frac{45000}{10946} = 4.11$ e per $A_f = 615.4$ mm^2; per tali dati i valori di asse neutro ed inerzia della sezione fessurata omogeneizzata sono stati già calcolati in precedenza (verifiche tensionali in combinazione quasi-permanente) e risultano: x_2= 89.1 mm e $I_2 = 631.8 \cdot 10^6$ 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 $A_f = 615.4$ 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 (secondo Eq. (7.5)):

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

$$\gamma = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^2$$

- β_1 = 0.85 per barre con Classe di aderenza 1 e 0.70 per barre con Classe di aderenza 2;

- β_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 (4) 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 $M_{cr} = \frac{b \cdot h^2}{6} f_{ctm} = 52.14$ kN m (si osserva che il calcolo esatto del momento tenendo conto del contributo delle barre di FRP fornisce $M_{cr} = \frac{f_{ctm} \cdot I_1}{(h - x_1)} = 52.90$ kN m, di poco differente dal valore ottenuto trascurando le armature).

Si ottiene pertanto:

- per barre con Classe di aderenza 1:

$$\gamma = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^2 = 1 - 0.5 \cdot 0.85 \cdot \left(\frac{52.14}{85.94} \right)^2 = 0.84$$

$$f = f_1 \cdot (1 - \gamma) + f_2 \cdot \gamma = 0.16 \cdot 2.3 + 0.84 \cdot 20.4 = 17.56 \text{ mm}$$

- per barre con Classe di aderenza 2:

$$\gamma = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^2 = 1 - 0.5 \cdot 0.7 \cdot \left(\frac{52.14}{85.94} \right)^2 = 0.87$$

$$f = f_1 \cdot (1 - \gamma) + f_2 \cdot \gamma = 0.13 \cdot 2.3 + 0.87 \cdot 20.4 = 18.05 \text{ mm}$$

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 $\varepsilon_{rit} = 0.00035$, $I_2 = 631.8 \cdot 10^6$ mm^4, $S_c = \frac{b \cdot x_2^2}{2}$ e x_2= 89.1 mm.

La freccia complessiva risulta pertanto:

- per barre con Classe di aderenza 1:

$$f_{tot} = f + f_{rit} = 17.56 \text{ mm} + 2.06 \text{ mm} = 19.65 \text{ mm} \rightarrow \frac{f}{L} = \frac{19.05}{5000} = 0.0039 < \frac{1}{250} = 0.004$$

- per barre con Classe di aderenza 2:

$$f_{tot} = f + f_{rit} = 18.05 \text{ mm} + 2.06 \text{ mm} = 20.11 \text{ mm} \rightarrow \frac{f}{L} = \frac{20.11}{5000} = 0.0040 = \frac{1}{250} = 0.004$$

17.1.4 Sintesi delle verifiche a flessione

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 mm necessarie per soddisfare le singole verifiche.

Tabella 17-1 - Sintesi delle verifiche a flessione per diversi SLE e per lo SLU: numero minimo di barre d_b = 14 mm necessarie al soddisfacimento di ciascuna verifica

Combinazione di carico	**SLE Controllo ampiezza delle fessure**	**SLE Limitazione delle tensioni**	**SLE Controllo delle frecce (L/250)**	**SLU**
SLU				4 barre d_b =14 mm
Quasi permanente	$w_k \leq 0.6$ mm Classe aderenza 1: 4 barre d_b =14 mm Classe aderenza 2: 5 barre d_b =14 mm	3 barre d_b =14 mm	Classe aderenza 1: 4 barre d_b =14 mm * Classe aderenza 2: 4 barre d_b =14 mm *	
Frequente	$w_k \leq 0.7$ mm Classe aderenza 1: 5 barre d_b =14 mm Classe aderenza 2: 5 barre d_b =14 mm			
Rara		5 barre d_b =14 mm	Classe aderenza 1: 5 barre d_b =14 mm Classe aderenza 2: 5 barre d_b =14 mm	

*Comprensiva del ritiro

17.2 PROGETTO A TAGLIO DI TRAVI DI CALCESTRUZZO ARMATE CON STAFFE DI FRP

Si riporta di seguito un esempio di progetto a taglio agli SLU, di una trave in calcestruzzo armato con barre di GFRP. Si considera la sezione rettangolare caratterizzata dalla seguente geometria:

- base b = 300 mm,
- altezza totale h = 500 mm,
- copriferro (meccanico) c = 40 mm,
- altezza utile d = 460 mm

Si considera una trave con luce L = 5 m con schema statico di semplice appoggio ad entrambi gli estremi. Si assume un calcestruzzo di classe C30/37, quindi, con resistenza cilindrica caratteristica f_{ck} = 30 MPa.

Si assume che la trave sia soggetta al seguente carico di progetto:

- Combinazione SLU (fondamentale): $q_{d,SLU}$ = 52 kN/m

Si ipotizza che la trave sia armata a flessione con barre con diametro nominale d_b = 16 mm in fibra di vetro (GFRP) di classe E45/850, caratterizzate, quindi, da una resistenza a trazione caratteristica f_{ftk0} = 850 MPa e da un valore medio del modulo elastico E_f = 45 GPa; la percentuale di armatura è ρ = 0.6%. Si ipotizza di utilizzare come armatura a taglio staffe in fibra di vetro (GFRP) della stessa classe E45/850 e diametro nominale d_b = 8 mm.

In assenza di dati sperimentali e/o schede tecniche, si assume che la tensione caratteristica delle staffe in GFRP sia pari a:

$f_{ubk} = 0.4\, f_{ftk0}$ = 340 MPa

ed il valore di progetto sia, quindi:

$$f_{ubd} = \eta_a \cdot \eta_T \cdot \frac{f_{ubk}}{\gamma_f} = 186 \text{ MPa}$$

avendo assunto f_{ftk0} = 850 MPa, η_a = 0.85, η_T = 0.9, γ_f = 1.40.

Come indicato nella Eq. (6.14), non si applica coefficiente riduttivo per tener conto degli effetti di viscosità nelle barre indotti da uno stato tensionale persistente.

Il momento massimo corrispondente al carico di progetto è $M_{Ed,max}$ = 162.5 kN m, mentre il taglio sollecitante massimo agli appoggi risulta essere pari a $V_{Ed,max}$ = 130 kN.

Si valutano in primo luogo i valori minimi di armatura trasversale (§6.8.3 e §6.8.3.1). Con staffe di diametro nominale 8 mm, si ottiene un passo massimo di 115 mm nella sezione di appoggio e 330 mm in campata. Occorre, inoltre, che sia $\rho_{s,min}$ = 0.1%.

Si dispone, pertanto, in prima istanza, una staffatura minima pari a:

- in prossimità dell'appoggio: d_b = 8 mm con passo s =100 mm
- in campata: d_b = 8 mm con passo s = 300 mm

17.2.1 Verifica in appoggio (passo staffe 100 mm)

Come ipotizzato in precedenza, si considera la presenza di staffe d_b = 8 mm con passo 100 mm. Sull'appoggio il taglio sollecitante vale:

$V_{Ed,max}$ = 130 kN

Il taglio resistente è pari a:

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

Il taglio $V_{Rd,c}$, calcolato con la (6.15), con cot(θ)=1, risulta pari a 527.8 kN in base a quanto segue:

$$V_{Rd,c} = 0.9b \cdot d \cdot \alpha_c \cdot \nu \cdot f_{cd} \cdot 0.5 \quad (6.15)$$

essendo f_{cd} = 17 MPa e ν = 0.5.

Si calcola, dunque: $V_{Rd} = V_{Rd,f} + V_{Rd,ct}$.

Per calcolare $V_{Rd,ct}$ si fa uso delle (6.11a), (6.11b) e (6.11c), come segue:

$$V_{Rd,ct} = \frac{k_s}{\gamma_V} \cdot k \cdot \left(100\rho_l \cdot \frac{E_f}{210} \cdot f_{ck}\right)^{1/3} \cdot b_w \cdot d \geq V_{Rd,ct,min} \quad \text{con } \gamma_V = 1.5. \quad (6.11a)$$

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

$$V_{Rd,ct} = \frac{k'_s}{\gamma_V} \cdot \left(100\rho_l \cdot \frac{E_f}{210} \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d}\right)^{1/3} \cdot b_w \cdot d \geq V_{Rd,ct,min} \quad \text{con } \gamma_V = 1.4 \quad (6.11c)$$

Nelle (6.11) i simboli utilizzati assumono i seguenti valori:

- $b_w = b$ = 300 mm;
- d = 460 mm;
- k_s = 0.20, coefficiente calibrato su base sperimentale;
- $\rho_l = A_f/(bd) \leq 0.02$,rapporto geometrico di armatura longitudinale tesa A_f adeguatamente ancorata rispetto all'area della sezione in calcestruzzo, = 0.006;
- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$ pari a 1.66;
- E_f, modulo elastico delle barre di FRP che costituiscono l'armatura longitudinale espresso in GPa, pari a 45 GPa, con E_f / E_s =0.21.
- k'_s = 0.82, coefficiente calibrato su base sperimentale;
- d_{dg}, parametro funzione della scabrezza del calcestruzzo, da calcolarsi come:

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

in cui si assume che il diametro massimo D_{max} degli inerti sia pari a 20 mm e che sia utilizzato al posto di D_{min} (più piccolo diametro del vaglio più grande). Si ottiene, pertanto, d_{dg} = 16 mm + 20 mm = 36 mm.

Visto che i valori del taglio associato ai meccanismi resistenti del calcestruzzo, $V_{Rd,ct}$, dati dalle (6.11a) e (6.11c) sono minori del valore minimo, $V_{Rd,ct,min}$, dato dalla (6.11b), si assume quest'ultimo come taglio resistente (si veda Tabella 17-2): $V_{Rd,ct} = V_{Rd,ct,min} = 56.5$ kN.

Tabella 17-2. Valori dei tagli resistenti $V_{Rd,ct}$ dati dalle Eq. (6.11)

$V_{Rd,ct}$ Approccio 1 - Eq. (6.11a)	$V_{Rd,ct}$ Approccio 2 - Eq. (6.11c)	$V_{Rd,ct,min}$ Valore minimo - Eq. (6.11b)
47.4 kN	53.7 kN	56.5 kN

Per il calcolo di $V_{Rd,f}$, si fa uso delle Eq. (6.13), con A_{sw} / s = 100 mm^2/100m, f_{ubd} = 186 MPa e cot(θ)=1:

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

$V_{Rd,f}$ = 76.9 kN

Si ottiene, dunque:

$V_{Rd} = 56.5 + 76.9 = 133.4$ kN > $V_{Ed} = 130$ kN con $V_{Rd}/V_{Ed} = 1.03$.

Pertanto, l'armatura a taglio ipotizzata permette di soddisfare la verifica.

Nella sezione di appoggio occorre verificare che l'armatura a flessione sia correttamente dimensionata, traslando il momento flettente come indicato dalla (6.16), e che questa sia correttamente ancorata oltre l'appoggio.

17.2.2 Verifica nella sezione a 1 m dall'appoggio (passo staffe 300 mm)

Si effettua la verifica nella sezione a distanza di 1 m dall'appoggio a partire dalla quale le staffe con diametro d_b = 8 mm hanno passo 300 mm. In tale sezione, il taglio sollecitante vale:

$V_{Ed} = V_{Ed,max} - q_{dSLU}$ 1 m = 78.0 kN

Il taglio resistente è pari a: $V_{Rd} = V_{Rd,f} + V_{Rd,ct}$

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

Per $V_{Rd,ct}$ si ha sempre 56.5 kN, come calcolato in appoggio, mentre per $V_{Rd,f}$ si fa uso delle (6.13), con A_{sw} / s = 100/300 mm^2/m, f_{ubd} = 186 MPa e cot(θ)=1, ottenendo:

$V_{Rd,f}$ = 25.7 kN

Si ottiene, dunque, il seguente taglio resistente complessivo:

$V_{Rd} = 56.5 + 25.7 = 82.2$ kN > $V_{Ed} = 78.0$ kN con $V_{Rd} / V_{Ed} = 1.05$.

Pertanto, l'armatura a taglio ipotizzata permette di soddisfare la verifica.

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

Aiello, Prof.ssa Maria Antonietta	Università del Salento
Ascione, Prof. Luigi	Università di Salerno
Bilotta, Prof. Antonio	Università degli Studi di Napoli Federico II
Bonati, Ing. Antonio	Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR ITC)
Camata, Prof. Guido	Università di Chieti–Pescara
Ceroni, Prof.ssa Francesca	Università degli Studi di Napoli "Parthenope"
D'Antino, Prof. Tommaso	Politecnico di Milano
Di Ludovico, Prof. Marco	Università degli Studi di Napoli Federico II
Ferretti, Ing. Francesca	Università di Bologna, Alma Mater Studiorum
Focacci, Prof. Francesco	Università eCampus
Franco, Ing. Annalisa	Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR ITC)
Frassine, Prof. Roberto	Politecnico di Milano
Galati, Dott.ssa E. Nessa	Structural Technologies, Columbia, Maryland, USA
Leone, Prof.ssa Marianovella	Università del Salento
Lignola, Prof. Gian Piero	Università degli Studi di Napoli Federico II
Magliulo, Prof. Gennaro	Università degli Studi di Napoli Federico II
Mazzotti, Prof. Claudio	Università di Bologna, Alma Mater Studiorum
Monti, Prof. Giorgio	Università "La Sapienza" di Roma
Napoli, Prof.ssa Annalisa	Università di Salerno
Nanni, Prof. Antonio	Università di Miami, USA
Nigro, Prof. Emidio	Università degli Studi di Napoli Federico II
Occhiuzzi, Prof. Antonio	Università degli Studi di Napoli "Parthenope"
Pecce, Prof.ssa Marisa	Università degli Studi di Napoli Federico II
Pisani, Prof. Marco A.	Politecnico di Milano
Poggi, Prof. Carlo	Politecnico di Milano
Prota, Prof. Andrea	Università degli Studi di Napoli Federico II
Puppio, Ing. Mario Lucio	Università di Cagliari
Realfonzo, Prof. Roberto	Università di Salerno
Saetta, Prof.ssa Anna	Università IUAV di Venezia
Savoia, Prof. Marco	Università di Bologna, Alma Mater Studiorum

Rappresentanti delle aziende

Balconi, Ing. Gabriele	Sireg Geotech S.r.l.
Casadei, Ing. Paolo	Owens Corning S.p.A.
Giamundo, Dott. Aniello	ATP S.r.l.
Morandini, Ing. Giulio	Mapei S.p.A.
Moroni, Sig. Federico	SIKA S.p.A.
Ussia, Ing. Gianluca	Fibrenet S.p.A.

Coordinatori:

prof. Marco SAVOIA, Università di Bologna, Alma Mater Studiorum
prof. Francesca CERONI, Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

Il presente Documento Tecnico è stato approvato in versione preliminare il 11/04/2025, per essere sottoposto ad inchiesta pubblica, dalla "*Commissione di studio per la predisposizione e l'analisi di norme tecniche relative alle costruzioni*" così composta:

Angotti, Prof. Franco	Università di Firenze
Ascione, Prof. Luigi	Università di Salerno
Auricchio, Prof. Ferdinando	Università di Pavia
Aversa, Prof. Stefano	Università degli Studi di Napoli "Parthenope"
Baratta, Prof. Alessandro	Università degli Studi di Napoli Federico II
Bonati, Ing. Antonio	Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR ITC)
Cosenza, Prof. Edoardo	Università degli Studi di Napoli Federico II
Da Porto, Prof.ssa Francesca	Università di Padova
Di Prisco, Prof. Marco	Politecnico di Milano
Iervolino, Prof. Iunio	Università degli Studi di Napoli Federico II
Lagomarsino, Prof. Sergio	Università di Genova
Mancini, Prof. Giuseppe	Politecnico di Torino
Mazzolani, Prof. Federico Massimo	Università degli Studi di Napoli Federico II
Occhiuzzi, Prof. Antonio (Presidente)	Università degli Studi di Napoli "Parthenope" e CNR ITC
Pecce, Prof.ssa Maria Rosaria	Università degli Studi di Napoli Federico II
Pinto, Prof. Paolo Emilio	Università "La Sapienza" di Roma
Poggi, Prof. Carlo	Politecnico di Milano
Prota, Prof. Andrea	Università degli Studi di Napoli Federico II
Renzi, Ing. Emanuele	ANSFISA
Royer Carfagni, Prof. Gianni	Università di Parma
Saetta, Prof.ssa Anna	Università IUAV di Venezia
Savoia, Prof. Marco	Università di Bologna, Alma Mater Studiorum
Urbano, Prof. Carlo	Politecnico di Milano
Zanon, Prof. Paolo	Università di Trento

In data 03/02/2026, il presente Documento Tecnico è stato approvato in versione definitiva, con le modifiche e suggerimenti emersi dall'inchiesta pubblica, dalla "*Commissione di studio per la predisposizione e l'analisi di norme tecniche relative alle costruzioni*" così composta:

Angotti, Prof. Franco	Università di Firenze
Ascione, Prof. Luigi	Università di Salerno
Auricchio, Prof. Ferdinando	Università di Pavia
Aversa, Prof. Stefano	Università degli Studi di Napoli "Parthenope"
Baratta, Prof. Alessandro	Università degli Studi di Napoli Federico II
Bonati, Ing. Antonio	Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR ITC)
Cosenza, Prof. Edoardo	Università degli Studi di Napoli Federico II
Da Porto, Prof.ssa Francesca	Università di Padova
Di Prisco, Prof. Marco	Politecnico di Milano
Iervolino, Prof. Iunio	Università degli Studi di Napoli Federico II
Lagomarsino, Prof. Sergio	Università di Genova
Landolfo, Prof. Raffaele	Università degli Studi di Napoli Federico II
Mancini, Prof. Giuseppe	Politecnico di Torino
Magenes, Prof. Guido	Università degli Studi di Pavia
Mazzolani, Prof. Federico Massimo	Università degli Studi di Napoli Federico II
Occhiuzzi, Prof. Antonio (Presidente)	Università degli Studi di Napoli "Parthenope" e CNR ITC
Pecce, Prof.ssa Maria Rosaria	Università degli Studi di Napoli Federico II
Poggi, Prof. Carlo	Politecnico di Milano
Prota, Prof. Andrea	Università degli Studi di Napoli Federico II
Royer Carfagni, Prof. Gianni	Università di Parma
Saetta, Prof.ssa Anna	Università IUAV di Venezia
Savoia, Prof. Marco	Università di Bologna, Alma Mater Studiorum
Urbano, Prof. Carlo	Politecnico di Milano