

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

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

**Istruzioni
per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo
di Strutture
di Calcestruzzo Fibrorinforzato**



**VERSIONE SOTTOPOSTA AD INCHIESTA PUBBLICA
FINO AL 30 GIUGNO 2006**

CNR-DT 204/2006

Proprietà letteraria riservata
del

Consiglio Nazionale delle Ricerche

INDICE

1	PREMESSA	5
1.1	CONTENUTO E SCOPO DELLE ISTRUZIONI.....	6
1.2	NORMATIVE DI RIFERIMENTO	7
1.3	SIMBOLOGIA	7
1.4	PROPRIETA' E COMPORTAMENTO STRUTTURALE DI ELEMENTI DI CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO	8
2	MATERIALI	10
2.1	FIBRE	10
2.1.1	Lunghezza delle fibre.....	10
2.1.2	Diametro equivalente	10
2.1.3	Rapporto d'aspetto	10
2.1.4	Resistenza a trazione delle fibre.....	11
2.1.5	Modulo di elasticità.....	11
2.2	FIBRE DI ACCIAIO	11
2.3	FIBRE POLIMERICHE E DI CARBONIO.....	12
2.4	MATRICI.....	14
2.5	CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO	14
2.5.1	Proprietà del calcestruzzo fresco.....	14
2.5.1.1	Proprietà reologiche del calcestruzzo fibrorinforzato.....	14
2.5.1.2	Omogeneità dell'impasto.....	14
2.5.1.3	Ritiro in fase plastica	15
2.5.2	Proprietà meccaniche del calcestruzzo indurito.....	15
2.5.2.1	Comportamento a compressione	15
2.5.2.2	Comportamento a trazione.....	15
2.5.2.3	Legame costitutivo in termini di tensione-deformazione	18
2.5.2.4	Modulo di elasticità	20
2.5.3	Proprietà fisiche del calcestruzzo indurito	20
2.5.3.1	Ritiro idraulico.....	20
2.5.3.2	Resistenza al gelo	20
2.5.3.3	Penetrazione di ioni aggressivi	20
2.5.3.4	Carbonatazione	20
2.5.3.5	Ossidazione delle fibre	20
2.5.3.6	Comportamento al fuoco	21
2.6	ACCIAIO.....	21
3	CONCETTI BASILARI DEL PROGETTO E PROBLEMI SPECIALI	22
3.1	GENERALITA'	22
3.2	REQUISITI FONDAMENTALI	22
3.3	VITA UTILE DELLA STRUTTURA.....	23
3.4	PRINCIPI GENERALI DEL PROGETTO STRUTTURALE.....	23
3.4.1	Generalità	23
3.4.2	Azioni di progetto	24
3.4.3	Proprietà dei materiali	24
3.4.4	Capacità resistente di progetto	24
3.5	VALORI CARATTERISTICI DELLE RESISTENZE.....	24
3.6	COEFFICIENTI PARZIALI	25
3.6.1	Coefficienti parziali dei materiali	25

3.6.2	Coefficienti parziali γ_{Rd} per i modelli di resistenza	25
3.7	REQUISITI DI DURABILITA'	25
4	VERIFICA DI RESISTENZA ALLO STATO LIMITE ULTIMO.....	28
4.1	STATO LIMITE ULTIMO PER ELEMENTI MONODIMENSIONALI.....	28
4.1.1	Generalità	28
4.1.2	Pressoflessione	28
4.1.3	Taglio	29
4.1.3.1	Generalità	29
4.1.3.2	Metodo di calcolo a taglio di travi in assenza di armatura longitudinale e trasversale convenzionale	29
4.1.3.3	Metodo di calcolo a taglio di travi con armatura longitudinale tradizionale e in assenza di armatura trasversale convenzionale.....	29
4.1.3.4	Metodo di calcolo a taglio di travi con armatura longitudinale e trasversale convenzionale	30
4.1.3.5	Armatura minima a taglio	31
4.1.4	Torsione	32
4.1.4.1	Metodo di calcolo a torsione di travi in assenza di armatura longitudinale e trasversale convenzionale	32
4.1.4.2	Metodo di calcolo a torsione di travi con armatura longitudinale e trasversale convenzionale	32
4.2	ELEMENTI LASTRA	32
4.2.1	Elementi senza armatura convenzionale	32
4.2.2	Elementi con armatura convenzionale	33
4.3	ELEMENTI PIASTRA	34
4.3.1	Elementi senza armatura convenzionale	34
4.3.2	Elementi con armatura convenzionale	34
5	STATO LIMITE DI ESERCIZIO.....	35
5.1	VERIFICA DELLE TENSIONI.....	35
5.2	APERTURA DELLE FESSURE.....	35
5.3	ARMATURA MINIMA PER IL CONTROLLO DELLA FESSURAZIONE	35
6	ESECUZIONE.....	37
6.1	COMPOSIZIONE DELLA MISCELA	37
6.2	POSA DELLE ARMATURE	37
6.3	DIMENSIONI MINIME.....	37
6.3.1	Spessore minimo relativo	37
6.3.2	Spaziatura di armatura e copriferro minimi	38
6.4	ESECUZIONE DEI GETTI.....	38
7	RESISTENZA AL FUOCO.....	39
8	COLLAUDO E CONTROLLI DI PRODUZIONE	41
8.1	COLLAUDO	41
8.2	CONTROLLI DI PRODUZIONE PER APPLICAZIONI TIPO A	41
8.3	CONTROLLI DI PRODUZIONE PER APPLICAZIONI TIPO B.....	41
9	APPENDICE A (SULLA RESISTENZA A TRAZIONE: IDENTIFICAZIONE DEI PARAMETRI COSTITUTIVI)	42
9.1	MATERIALI DEGRADANTI A TRAZIONE IDENTIFICATI CON PROVE DI FLESSIONE	42
9.1.1	Modello elastico lineare	42

9.1.2	Modello rigido-plastico.....	44
9.1.3	Provino intagliato (secondo la norma UNI 11039).....	44
9.1.4	Provino strutturale non intagliato (secondo la norma UNI U73041440).....	45
9.2	MATERIALI IDENTIFICATI CON PROVE DI TRAZIONE	46
9.2.1	Provino intagliato (secondo la norma UNI U73041440).....	46
9.2.2	Provino non intagliato	47
10	APPENDICE B (SUL CONTROLLO E SUI CRITERI DI CONFORMITÀ)	48
10.1	PROVE DI FLESSIONE SU MATERIALE CLASSIFICATO DEGRADANTE	48
11	APPENDICE C (SULLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE MECCANICA PER MATERIALI INCRUDENTI)	50
11.1	PROVA DI TRAZIONE.....	50
11.1.1	Preparazione del provino	50
11.1.2	Apparecchiatura di prova	50
11.1.3	Procedura di carico.....	51
11.2	PROVA DI FLESSIONE.....	51
12	APPENDICE D (SULLA RESISTENZA DEI MATERIALI: CALCOLO DEI VALORI CARATTERISTICI PER LA PROGETTAZIONE DELLE STRUTTURE)	52
13	APPENDICE E (SULLA DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DEI COEFFICIENTI DI DEGRADO).....	55

1 PREMESSA

Il presente documento arricchisce la collana delle pubblicazioni edita negli ultimi anni dal CNR sull'uso strutturale dei materiali compositi, inaugurata dalle Istruzioni n. 200 del 2004. I documenti finora pubblicati hanno avuto per oggetto, nell'ordine, il placcaggio mediante materiali compositi fibrorinforzati a fibre lunghe (FRP) di strutture di calcestruzzo armato ordinario o precompresso e di strutture murarie (CNR-DT 200/2004), il placcaggio di strutture lignee (CNR-DT 201/2005), quello di strutture metalliche (CNR-DT 202/2005) ed infine l'uso di barre di FRP come armatura di getti di calcestruzzo cementizio (CNR-DT 203/2006).

L'argomento del presente documento è l'impiego strutturale di un tipo di materiale composito completamente differente: il calcestruzzo fibrorinforzato (FRC, *Fiber Reinforced Concrete*). Esso non ha una matrice polimerica come gli FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) ma è un calcestruzzo cementizio additivato con fibre corte di acciaio, di materiale polimerico, di materiale inorganico quale carbonio o vetro, o di materiali naturali, cui possono aggiungersi in opera usuali barre di armatura, lente o pretese.

L'aggiunta delle fibre conferisce al calcestruzzo, dopo la fessurazione, una significativa resistenza residua a trazione (di seguito denominata tenacità). Quest'ultima dipende da molteplici fattori, tra i quali ad esempio il rapporto di aspetto (ovvero il rapporto lunghezza/diametro equivalente delle fibre), la percentuale volumetrica delle fibre, le caratteristiche fisico-meccaniche di queste ultime.

Le costruzioni realizzate con FRC si sono progressivamente diffuse negli ultimi anni in tutto il mondo, rendendo indispensabile la redazione di Linee Guida o Istruzioni tecniche in grado di orientare e disciplinare l'impiego strutturale di tali materiali.

I documenti più significativi disponibili in campo internazionale sono i seguenti:

- RILEM, 2001, "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: uniaxial tension test for steel fibre reinforced concrete", RILEM TC 162-TDF Recommendations, *Materials and Structures*, 34: 3-6;
- RILEM, 2000, "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: beam test", RILEM TC 162-TDF Recommendations, *Materials and Structures*, 33: 3-5;
- ACI Committee 544, 1999, "Measurement of properties of Fiber Reinforced Concrete", ACI 544.2R-98, *American Concrete Institute*, ACI Farmington Hills, MI;
- ACI Committee 544, 1996, "Design considerations for steel Fiber Reinforced Concrete", ACI 544.4R-88, *American Concrete Institute*, ACI Farmington Hills, MI;
- ACI Committee 544, 1996, "State of the art Report on Fiber Reinforced Concrete", ACI 544.1R-96, *American Concrete Institute*, ACI Farmington Hills, MI;
- JCI, 1984, "Method of tests for flexural strength and flexural toughness of fiber reinforced concrete", JCI Standard SF-4, JCI Standards for test methods of fiber reinforced concrete, *Japan Concrete Institute*.

Esempi applicativi degli FRC di particolare rilievo ed interesse sono rappresentati da:

- pannelli portanti di facciata;
- piastre di pavimentazione;
- conci prefabbricati e rivestimenti finali di tunnel;
- travi;
- giunti o nodi strutturali, per il vantaggio offerto di ridurre le usuali elevate percentuali di armatura ivi presenti;
- elementi di copertura, per la possibilità di realizzare spessori sottili privi della consueta armatura disposta sul piano medio;

- strutture destinate ad assorbire urti e/o per resistere alla fatica, come collettori o tubazioni per elevate pressioni, traversine ferroviarie, pali ad alta resistenza, ecc.;
- travi precomprese prefabbricate, allo scopo di assorbire le tensioni di trazione in assenza di armature concentrate.

In linea di principio, l'uso del calcestruzzo fibrorinforzato è indicato soprattutto per le strutture iperstatiche, in quanto lo sforzo residuo di trazione può aumentare la capacità portante complessiva della struttura e migliorarne la duttilità.

Inoltre, l'introduzione nell'impasto cementizio di fibre corte può incrementare la tenacità dei calcestruzzi ad alte prestazioni, che, notoriamente, in assenza di fibre, risultano particolarmente fragili.

Scopo delle presenti Istruzioni è fornire, nell'ambito della Normativa vigente nel nostro Paese, un documento di tipo orientativo per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato: l'approccio seguito è quello del metodo semiprobabilistico agli stati limite; l'impostazione adottata, quella dei 'principi' e delle 'regole di applicazione', nello stile classico degli Eurocodici. Nel prosieguo i principi saranno indicati con la lettera (P).

Si richiama esplicitamente all'attenzione del lettore la circostanza che le Istruzioni, per loro genesi e natura, non sono norme cogenti, ma rappresentano una sintesi dell'estesa bibliografia disponibile, messa a disposizione dei tecnici, ai quali è comunque lasciata la responsabilità finale delle scelte operate.

Il documento è corredato di Appendici che approfondiscono alcuni aspetti teorici, richiamati sinteticamente nel corpo delle Istruzioni, ma meritevoli, per il loro carattere innovativo, di una trattazione più estesa, con finalità tipicamente divulgative.

1.1 CONTENUTO E SCOPO DELLE ISTRUZIONI

- (1) Formano oggetto del presente documento le strutture di calcestruzzo fibrorinforzato (FRC).
- (2)P Il calcestruzzo fibrorinforzato è un materiale composito caratterizzato da una matrice cementizia e da fibre discrete (discontinue). La matrice è costituita da calcestruzzi o da malte, normali o ad alte prestazioni. Le fibre possono essere di acciaio, di materiale polimerico, di carbonio, di vetro o di materiale naturale.
- (3)P Per impieghi strutturali deve essere garantito un dosaggio minimo di fibre come specificato nel Capitolo 2.
- (4) Nel presente documento sono considerate esclusivamente fibre metalliche, polimeriche e di carbonio. Le indicazioni fornite possono essere estese a calcestruzzi rinforzati con altri tipi di fibre, quali ad esempio quelle di vetro o naturali, purché venga dimostrato che il loro comportamento strutturale sia assimilabile a quello di elementi analoghi di calcestruzzo additivato con le fibre qui prese in considerazione.
- (5) Le proprietà del composito dipendono dalle caratteristiche dei materiali componenti e dai loro dosaggi ed in particolare dalla geometria, dalla percentuale volumetrica e dalle caratteristiche meccaniche della fibra, dall'aderenza tra la fibra e la matrice di calcestruzzo, dalle caratteristiche meccaniche della matrice. Le fibre possono contribuire a mitigare il fenomeno della fessurazione e/o incrementare significativamente l'energia assorbita nel processo di frattura (tenacità).
- (6) Una volta posto in opera, il calcestruzzo fibrorinforzato acquista proprietà che dipendono anche da fattori legati alla tecnologia esecutiva ed alle caratteristiche dimensionali della struttura. Tra questi rientrano, ad esempio, il grado di dispersione delle fibre nella miscela, la forma e le

dimensioni caratteristiche della struttura, l'eventuale anisotropia conferita dal rinforzo fibroso, la direzione di avanzamento e la modalità di maturazione del getto.

1.2 NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Nel prosieguo si fa ampio riferimento a prescrizioni contenute nelle norme di seguito elencate.

CEN EN 1992-1-1, 2004: Eurocode 2 – Design of concrete structures-Part 1-1:general rules and rules for buildings.

CEN prEN 14721 (draft March 2004): Precast concrete products – test method for methallic fiber concrete – measuring the fiber concrete in fresh and hardened concrete.

CEN prEN 14651 (draft March 2004): Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (*LOP*), residual).

UNI U73041440, 2004: Progettazione, esecuzione e controllo degli elementi strutturali in calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio.

UNI 11039, 2003: Calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio; (1a) Parte I: Definizioni, classificazione e designazione; (1b) Parte II: Metodo di prova per la determinazione della resistenza di prima fessurazione e degli indici di duttilità.

UNI EN 12390, 2002: Prove sul calcestruzzo indurito.

UNI EN 206-1, 2001: Calcestruzzo: specificazione, prestazione, produzione e conformità.

UNI 9502, 2001: Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso.

1.3 SIMBOLOGIA

Notazioni generali

- (.)_c valore della grandezza (.) riferita al calcestruzzo
- (.)_d valore di progetto (o di calcolo) della grandezza (.)
- (.)_{exp} valore della grandezza (.) dedotto da prove sperimentali
- (.)_F valore della grandezza (.) riferita al composito fibrorinforzato
- (.)_k valore caratteristico della grandezza (.)
- (.)_m valore medio della grandezza (.)
- (.)_R valore della grandezza (.) vista come resistenza
- (.)_s valore della grandezza (.) riferita all'acciaio
- (.)_S valore della grandezza (.) vista come sollecitazione
- (.)_u valore ultimo della grandezza (.)

Lettere romane maiuscole

- A_c area della sezione di calcestruzzo, al netto delle armature metalliche
- A_f area della sezione della fibra
- A_{sl} area dell'armatura longitudinale convenzionale
- A_{sw} area dell'armatura trasversale convenzionale relativa al passo p
- K_{Fc} coefficiente di degrado della resistenza a compressione
- K_{Ft} coefficiente di degrado della resistenza a trazione
- P carico di prova
- T temperatura
- V_f frazione volumetrica (volume fibre/volume fibrorinforzato)
- V_{Rd} resistenza a taglio dell'elemento strutturale
- $V_{Rd,F}$ contributo del calcestruzzo fibrorinforzato alla resistenza a taglio
- $V_{Rd,s}$ contributo delle armature metalliche trasversali alla resistenza a taglio di progetto

Lettere romane minuscole

b_f	larghezza della fibra per sezioni rettangolari
d	altezza utile della sezione
d_a	diametro degli aggregati
d_f	diametro equivalente della fibra
f_F	resistenza a compressione (prismatica o cilindrica) del fibrorinforzato
f_{Ft}	resistenza a trazione del fibrorinforzato
f_{Ftf}	resistenza a (trazione per) flessione del fibrorinforzato
f_{Fts}	resistenza a trazione residua di esercizio
f_{Ftu}	resistenza a trazione residua ultima
f_c	resistenza a compressione (prismatica o cilindrica) della matrice
f_{ct}	resistenza a trazione della matrice
f_{ctf}	resistenza a (trazione per) flessione della matrice
f_y	tensione di snervamento dell'acciaio dell'armatura longitudinale convenzionale
f_{yw}	tensione di snervamento dell'acciaio dell'armatura trasversale convenzionale
h	altezza della sezione
h_f	spessore della fibra per sezioni rettangolari
i	interferro
l_{cs}	lunghezza caratteristica dell'elemento strutturale
l_f	lunghezza della fibra
l_d	lunghezza in sviluppo della fibra
m	massa della fibra
p	passo dell'armatura trasversale convenzionale
s_{rm}	distanza media tra le fessure
t	spessore dell'elemento strutturale
w	apertura di fessura (CTOD – Crack Tip Opening Displacement)
x	distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso
y	distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo teso

Lettere greche minuscole

ε_F	deformazione marginale a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato
ε_c	deformazione marginale a compressione del calcestruzzo fibrorinforzato
ε_s	deformazione dell'acciaio
ϕ	diametro delle barre di armatura
γ_c	coefficiente parziale a compressione del fibrorinforzato
γ_F	coefficiente parziale a trazione del fibrorinforzato
γ_{Rd}	coefficiente parziale per i modelli di resistenza
γ_s	coefficiente parziale dell'acciaio
ρ_f	densità di massa della fibra

1.4 PROPRIETÀ E COMPORTAMENTO STRUTTURALE DI ELEMENTI DI CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO

(1)P L'aggiunta di fibre disperse in una matrice cementizia ne modifica le proprietà meccaniche. In particolare, migliora il comportamento a trazione contrastando l'apertura progressiva delle fessure.

Una volta raggiunta la fessurazione della matrice, le fibre sono in grado di manifestare il proprio contributo, conferendo al composito una resistenza post-fessurazione assente nella matrice senza fibre.

Il comportamento fortemente degradante, tipico di una prova di trazione monoassiale sul calcestruzzo, può essere modificato in modo significativo dall'aggiunta di fibre, al crescere della percentuale volumetrica, V_f , di esse.

Per piccole percentuali volumetriche di fibre (circa 0.2-2%) il legame carico-spostamento a trazione di un FRC presenta ancora un ramo discendente (comportamento degradante), ma è caratterizzato da una resistenza residua e da una maggiore tenacità (Figura 1-1a). Per percentuali volumetriche di fibre superiori (circa 2-8%), il comportamento può diventare incrudente, grazie alla comparsa di una multifessurazione (Figura 1-1b).

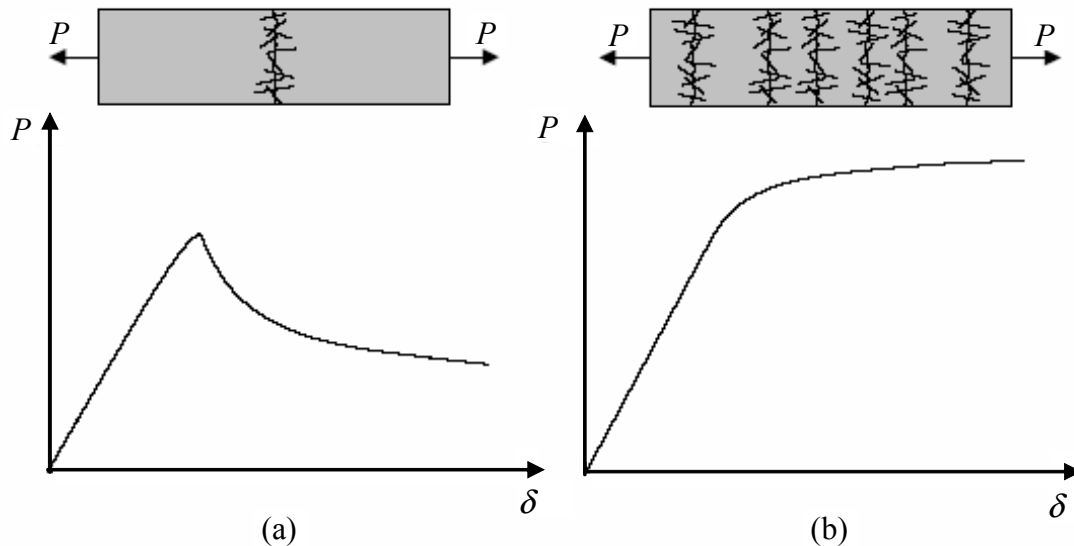


Figura 1-1 – Curva carico P – spostamento δ per conglomerati fibrorinforzati caratterizzati da: basse percentuali di fibre (a) e alte percentuali di fibre (b).

(2)P Le proprietà del calcestruzzo fibrorinforzato, confezionato per uno specifico impiego strutturale, devono essere prescritte e verificate opportunamente.

Vengono distinti due tipi di caratterizzazione del fibrorinforzato indurito: una basata sulle proprietà nominali, l'altra sulle proprietà strutturali.

(3)P Le proprietà nominali del fibrorinforzato indurito devono essere determinate su provini normalizzati, realizzati e maturati in condizioni controllate, mediante prove standard di laboratorio.

(4)P Le proprietà strutturali del fibrorinforzato devono essere riferite al materiale in opera e devono essere valutate a partire da provini aventi la stessa dimensione significativa della struttura realizzata. Tali provini devono essere maturati nello stesso ambiente della struttura di provenienza e la direzione del carico di prova, rispetto a quella del getto, deve essere la stessa delle tensioni cui è sottoposta la struttura.

2 MATERIALI

2.1 FIBRE

(1)P Le fibre risultano caratterizzate, oltre che dal tipo di materiale, da parametri geometrici quali la lunghezza, il diametro equivalente, il rapporto d'aspetto e forma (fibre lisce, uncinate, ecc.).

2.1.1 Lunghezza delle fibre

(1)P La lunghezza della fibra, l_f , è la distanza tra le estremità della fibra.

La lunghezza in sviluppo della fibra, l_d , è la lunghezza della linea d'asse della fibra.

La lunghezza della fibra deve essere misurata in accordo con norme di riferimento specifiche.

2.1.2 Diametro equivalente

(1)P Il diametro equivalente, d_f , è il diametro di un cerchio con area uguale all'area media della sezione trasversale della fibra.

(2) Per sezioni circolari con diametro maggiore di 0.3 mm, il diametro equivalente delle fibre deve essere misurato mediante un micrometro, in due direzioni approssimativamente tra loro ortogonali, con una precisione stabilita da norme di riferimento specifiche. Il diametro equivalente è fornito dalla media dei due diametri.

(3) Per fibre con diametro minore di 0.3 mm, il diametro deve essere misurato mediante strumenti ottici, con una precisione stabilita da norme di riferimento specifiche.

(4) Per sezioni ellittiche, il diametro equivalente delle fibre deve essere valutato a partire dalle misure dei due assi, eseguite mediante micrometro con precisione stabilita da norme di riferimento specifiche. Il diametro equivalente è fornito dalla media delle lunghezze dei due assi.

(5) Per sezioni rettangolari, la larghezza, b_f , e lo spessore, h_f , della fibra devono essere misurati come stabilito da normative di riferimento specifiche. Il diametro equivalente è fornito dalla relazione:

$$d_f = \sqrt{\frac{4 \cdot b_f \cdot h_f}{\pi}}. \quad (2.1)$$

(6) Alternativamente, ed in particolare per fibre con sezioni irregolari, il diametro equivalente può essere calcolato mediante la relazione:

$$d_f = \sqrt{\frac{4 \cdot m}{\pi \cdot l_d \cdot \rho_f}}, \quad (2.2)$$

essendo m la massa, l_d la lunghezza in sviluppo e ρ_f la densità della fibra.

2.1.3 Rapporto d'aspetto

(1)P Il rapporto d'aspetto è definito come quoziente tra la lunghezza, l_f , e il diametro equivalente, d_f , della fibra.

2.1.4 Resistenza a trazione delle fibre

(1)P La resistenza a trazione della fibra è la tensione corrispondente alla massima forza di trazione sopportata dalla fibra.

(2) La resistenza a trazione deve essere valutata, in accordo a specifiche norme di riferimento, come rapporto tra la suddetta forza e l'area equivalente della sezione trasversale, definita come area del cerchio di diametro d_f .

Valori indicativi della resistenza sono forniti nella Tabella 2-1 e nella Tabella 2-2 per diversi tipi di fibre.

2.1.5 Modulo di elasticità

(1) Il modulo di elasticità della fibra deve essere valutato in accordo a norme di riferimento specifiche.

Valori indicativi del modulo di elasticità di alcuni tipi di fibre sono forniti nella Tabella 2-2.

2.2 FIBRE DI ACCIAIO

(1) Le fibre di acciaio hanno una lunghezza, l_f , compresa generalmente tra 6 mm e 70 mm ed un diametro equivalente, d_f , compreso tra 0.15 mm e 1.20 mm.

(2) Le fibre di acciaio possono essere classificate in base al processo di produzione, alla forma ed al tipo di materiale.

- Processo di produzione:
 - da filo trafilato (Tipo A);
 - da lamiera tagliata (Tipo B);
 - da altre fabbricazioni (Tipo C).
- Forma:
 - rettilinee;
 - sagomate (uncinate, ondulate, ecc.).
- Materiale:
 - di acciaio a basso contenuto di carbonio ($C \leq 0.20$, Tipo 1);
 - di acciaio ad alto contenuto di carbonio ($C > 0.20$, Tipo 2);
 - di acciaio inox (Tipo 3).

In base alle caratteristiche meccaniche le fibre possono essere invece classificate nelle tre categorie (R1, R2, R3) di Tabella 2-1.

Tabella 2-1 – Classi di resistenza delle fibre di acciaio.

Diametro equivalente [mm]	Resistenza minima a trazione [N/mm ²]												Prova di piegamento alternato
	R1				R2				R3				tutte le classi
	1)		2)		1)		2)		1)		2)		
	R _m	R _{p0,2}	R _m	R _{p0,2}	R _m	R _{p0,2}	R _m	R _{p0,2}	R _m	R _{p0,2}	R _m	R _{p0,2}	assenza di rotture
0.15≤ d _f <0.50	400	320	480	400	800	720	1080	900	1700	1360	2040	1700	
0.50≤ d _f <0.80	350	280	450	350	800	640	1040	800	1550	1240	2015	1550	
0.80≤ d _f ≤1.20	300	240	390	300	700	560	910	700	1400	1120	1820	1400	
1) Per fibre rettilinee 2) Per fibre sagomate													

Nella Tabella 2-1 i simboli R_m e $R_{p0.2}$ rappresentano, rispettivamente, la resistenza a trazione (corrispondente al carico massimo) e la resistenza di scostamento dalla proporzionalità con un'estensione non proporzionale pari allo 0.2% della lunghezza di base dell'estensimetro.

(3) Il modulo di elasticità delle fibre di acciaio può essere assunto pari a 200 GPa per le fibre a basso ed alto contenuto di carbonio e 170 GPa per quelle di acciaio inox.

2.3 FIBRE POLIMERICHE E DI CARBONIO

(1) Sono disponibili in commercio fibre polimeriche di acrilico, arammide, nylon, poliestere, polietilene e polipropilene, e fibre di carbonio.

(2) Le fibre possono essere utilizzate per migliorare:

- le proprietà plastiche a breve termine;
- la durabilità e la resistenza ai cicli di gelo e disgelo;
- la resistenza all'impatto e all'abrasione;
- la resistenza post-fessurazione della matrice, della malta o del calcestruzzo;
- la resistenza al fuoco.

(3) Le fibre possono essere distinte in microfibre, con lunghezze contenute nell'ordine dei millimetri, e macrofibre con lunghezze fino a 80 mm. Valori tipici del rapporto d'aspetto sono compresi tra 100 e 500.

(4) Le principali caratteristiche delle fibre polimeriche e di carbonio disponibili in commercio sono riportate in Tabella 2-2.

Tabella 2-2 – Proprietà delle fibre polimeriche e di carbonio.

Tipo di fibra	Diametro equivalente [10 ⁻³ mm]	Densità [g/mm ³]	Resistenza a trazione [MPa]	Modulo di elasticità normale [MPa]	Deformazione ultima [%]	Temperatura di ignizione (accensione) [°C]	Temperatura di fusione, ossidazione /decomposizione [°C]	Assorbimento d'acqua * [% in peso]
Acrilica	12.7-104.14	1.16-1.18	269-1000	13790-19306	7.5-50	-	221-235	1.0-2.5
Arammide I	11.94	1.44	2930	62055	4.4	Alta	482	4.3
Arammide II	10.16	1.44	2344	117215	2.5	Alta	482	1.2
Carbonio, PAN HM	7.62	1.6-1.7	2482-3034	379914	0.6-0.7	Alta	400	Nil
Carbonio, PAN HT	8.89	1.6-1.7	3447-3999	230293	1.0-1.5	Alta	400	Nil
Carbonio, pitch GP	9.91-12.95	1.6-1.7	483-793	27580-34475	2.0-2.4	Alta	400	3-7
Carbonio, pitch HP	8.89-17.78	1.80-2.15	1517-3103	151690-482650	0.5-1.1	Alta	500	Nil
Nylon	22.86	1.14	965	5171	20	-	200-221	2.8-5.0
Poliestere	19.81	1.34-1.39	227-1103	17237	12-150	593	257	0.4
Polietilene	25.4-1016	0.92-0.96	76-586	4999	3-80	-	134	Nil
Polipropilene	-	0.90-0.91	138-689	3447-4826	15	593	165	Nil
Polivinilalcol	14-600	1.30	880-1600	25000-40000	6-10			4.0

* in accordo con lo standard ASRM D570.

2.4 MATRICI

- (1)P La matrice di un FRC è costituita da materiale cementizio (calcestruzzo o malta).
- (2) Al fine di garantire un buon accoppiamento con le fibre ed una buona lavorabilità dell'impasto, la granulometria della matrice deve essere opportunamente progettata, ad esempio aumentando la frazione fine.
- (3) Le caratteristiche fisiche e meccaniche della matrice di calcestruzzo o di malta sono definite dalle specifiche norme di riferimento.

2.5 CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO

- (1)P Le proprietà fisiche e meccaniche del composito sono determinate dai dosaggi e dalle proprietà dei singoli componenti (matrice cementizia e fibre).
- (2) L'aggiunta di fibre può migliorare la tenacità, la durabilità, nonché la resistenza all'urto (resilienza), alla fatica ed all'abrasione della matrice cementizia.
- (3) Le proprietà meccaniche del calcestruzzo fibrorinforzato devono essere direttamente determinate su provini mediante prove normalizzate.
- (2)P Il dosaggio minimo di fibre per impieghi strutturali non deve essere inferiore allo 0.3% in volume.
- (4) In assenza di specifiche sperimentazioni le proprietà che non sono di seguito espressamente indicate possono essere assimilate a quelle del calcestruzzo ordinario.

2.5.1 Proprietà del calcestruzzo fresco

2.5.1.1 Proprietà reologiche del calcestruzzo fibrorinforzato

- (1)P Le proprietà reologiche dei calcestruzzi fibrorinforzati dipendono dalle caratteristiche di lavorabilità della matrice e dalla natura delle fibre, dal loro dosaggio e dalla loro geometria.
- (2) La presenza di fibre, con dosaggi tipici delle applicazioni strutturali, riduce la lavorabilità degli impasti, soprattutto nel caso di impiego di fibre con forme complesse e con elevati rapporti d'aspetto. Ove necessario, la lavorabilità può essere migliorata mediante opportuni interventi sulla composizione:
- aumentando la frazione fine e/o riducendo il diametro massimo dell'aggregato;
 - selezionando e dosando opportunamente additivi fluidificanti.

2.5.1.2 Omogeneità dell'impasto

- (1)P Le fibre devono presentare una distribuzione omogenea all'interno dell'impasto. Il raggiungimento di tale condizione può essere ostacolato dalla formazione di accumuli di fibre, comunemente indicati con i termini di "grumi", "ciuffi" o "grovigli". In particolare, la loro presenza, seppur limitata, può provocare occlusioni tali da rendere difficoltose le operazioni di pompaggio.

- (2) L'omogeneità dell'impasto può essere misurata attraverso il controllo del contenuto di fibre in campioni prelevati durante diverse fasi del getto (EN 14721).
- (3) Le proprietà del calcestruzzo fibrorinforzato si discostano tanto più dalle proprietà nominali quanto più ampie e diffuse sono le regioni con distribuzione disomogenea di fibre.
- (4) Occorre prestare particolare attenzione al possibile fenomeno di segregazione, soprattutto in presenza di matrici a base di malte additivate con fibre metalliche.

2.5.1.3 Ritiro in fase plastica

- (1)P L'ampiezza delle fessure da ritiro in fase plastica è ridotta dalla presenza delle fibre.
- (2) Le fibre che meglio soddisfano tale requisito sono le microfibre polimeriche (polipropilene).

2.5.2 Proprietà meccaniche del calcestruzzo indurito

2.5.2.1 Comportamento a compressione

- (1)P Le fibre sono generalmente in grado di ridurre la fragilità della matrice, ma non di influenzare sensibilmente il comportamento a compressione.
- (2) Nella pratica, il legame costitutivo del calcestruzzo fibrorinforzato ed in particolare la sua resistenza possono essere assimilati a quelli del materiale non rinforzato.

2.5.2.2 Comportamento a trazione

- (1)P Le fibre migliorano il comportamento a trazione della matrice in fase fessurata, come è illustrato schematicamente in Figura 2-1.

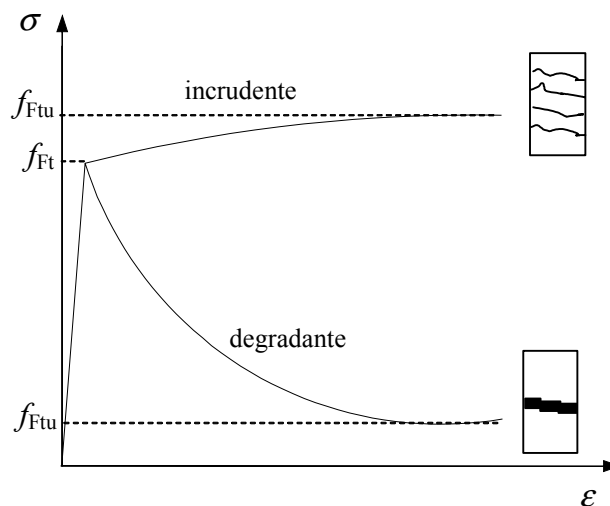


Figura 2-1 – Comportamento a trazione.

- (2) Per contenuti di fibre non elevati (con percentuale volumetrica indicativamente inferiore al 2%) il comportamento è di tipo degradante.

(3) Nel caso di elevati contenuti di fibre (con percentuale volumetrica indicativamente superiore al 2%), la resistenza può essere superiore a quella della matrice per effetto di un comportamento incrudente, legato ad un fenomeno di multifessurazione (Figura 2-1).

(4) La resistenza a trazione uniassiale di prima fessurazione del fibrorinforzato, f_{ft} , può essere assunta pari a quella della matrice, f_{ct} . Per materiali a comportamento degradante la resistenza f_{ft} può essere assunta pari a quella di picco (Figura 2-1).

(5) In entrambi i casi (comportamento degradante o incrudente), la resistenza a trazione uniassiale residua ultima del materiale, f_{ftu} (Figura 2-1), è significativamente influenzata dalla frazione volumetrica di fibre, V_f , dal rapporto d'aspetto, l_f/d_f , e dall'aderenza tra matrice e fibra.

Tale circostanza può essere facilmente dedotta dall'equilibrio in direzione normale alla superficie di frattura, assumendo le fibre parallele a tale direzione e valutando la forza di estrazione specifica, Q :

$$Q = n_f \cdot \pi \cdot d_f \cdot l_b \cdot \tau_m = \omega \cdot \frac{V_f}{A_f} \cdot \pi \cdot d_f \cdot l_b \cdot \tau_m = \omega \cdot V_f \cdot \frac{l_f}{d_f} \cdot \tau_m, \quad (2.3)$$

dove:

- n_f è il numero di fibre presenti sull'unità d'area della superficie di rottura;
- d_f è il diametro equivalente della fibra;
- $l_b = l_f/4$ è la lunghezza di ancoraggio convenzionale di ciascuna fibra;
- τ_m è lo sforzo tangenziale medio d'aderenza;
- ω è un coefficiente che tiene conto dell'effettivo orientamento delle fibre;
- V_f è la frazione volumetrica delle fibre;
- A_f è l'area della sezione retta della singola fibra.

L'equazione (2.3) fornisce un valore approssimato non tenendo conto di altri fattori, quali ad esempio la forma della fibra, l'interfaccia fibra-matrice, la direzione del getto, le modalità di mescolazione e compattazione del calcestruzzo fresco che influenzano la dispersione delle fibre nella matrice ed il loro orientamento.

(6) Viene suggerito, pertanto, un approccio di tipo prestazionale che identifichi sperimentalmente la curva costitutiva a trazione attraverso opportune prove su campioni di calcestruzzo fibrorinforzato.

Il legame tensione nominale - apertura di fessura, σ_N-w , può essere determinato mediante prove di trazione uniassiale o di flessione.

La prova di trazione uniassiale fornisce direttamente il legame $\sigma-w$ e può essere effettuata conformemente alla UNI U73041440.

Nel caso di materiale con comportamento degradante tale prova risulta di non semplice esecuzione.

In alternativa, può essere utilizzata la prova di flessione eseguita in conformità alla UNI 11039 (Figura 2-2).

In tal caso, la tensione nominale è valutata ipotizzando un comportamento elastico del provino (con riferimento alla Figura 2-2: $\sigma_N = 6 \cdot P \cdot l / b \cdot h^2$).

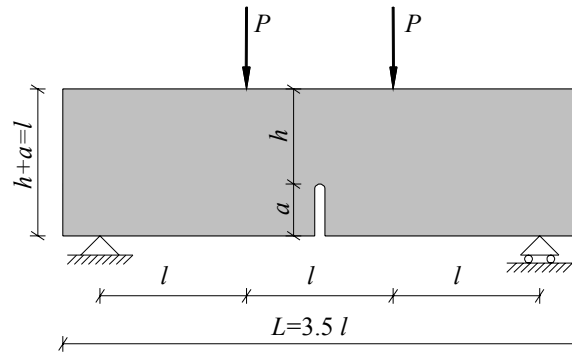


Figura 2-2 – Prova di flessione su quattro punti di carico proposta nella UNI 11039.

(7) Il legame σ - w dedotto dalla prova di flessione, eseguita ad esempio con le modalità riportate in Appendice A, è applicabile direttamente all'analisi di elementi inflessi. Per elementi soggetti a trazione centrata (o semplice), occorre penalizzare la resistenza mediante un coefficiente pari a 0.7. Nel caso in cui il risultato della prova di flessione su provino intagliato sia di tipo incrudente occorre ripetere la prova su provino non intagliato, per verificare la duttilità reale in assenza di intaglio. La prova di flessione su provino non intagliato può essere utilizzata anche nel caso di elementi sottili inflessi, per tener conto della direzione del getto, delle modalità di mescolazione e dell'effetto parete che possono giocare un ruolo rilevante (Appendice A).

(8) La resistenza post-fessurazione può essere definita sulla base di valori puntuali, f_i , corrispondenti ad assegnati valori nominali di apertura della fessura, o di valori medi, f_{eqi} , calcolati su un assegnato intervallo di apertura della fessura (Figura 2-3). Nel caso di provino intagliato, l'apertura della fessura può essere assunta convenzionalmente pari allo spostamento tra due punti posti all'apice dell'intaglio, CTOD.

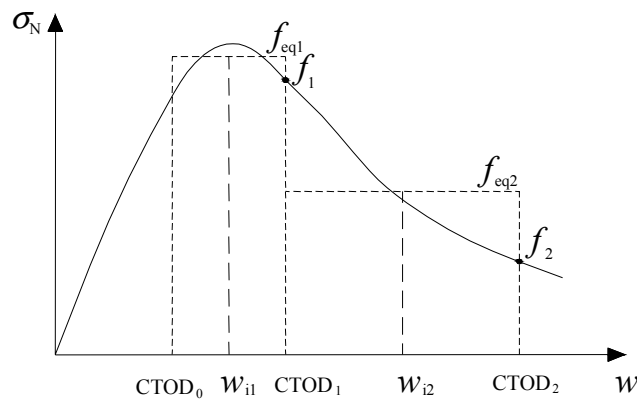


Figura 2-3 – Definizione di resistenza residua puntuale e media.

(9) Sulla base dei dati dedotti dalla prova di flessione si possono definire due legami semplificati tensione-apertura della fessura, con comportamento post-fessurativo lineare (incrudente o degradante) o rigido-plastico, come schematizzato in Figura 2-4. In quest'ultima, il simbolo f_{Fis} rappresenta la resistenza residua di esercizio, definita come resistenza post-fessurazione valutata in corrispondenza di aperture di fessure compatibili con l'esercizio; il simbolo f_{Ftu} rappresenta la resistenza ultima residua.

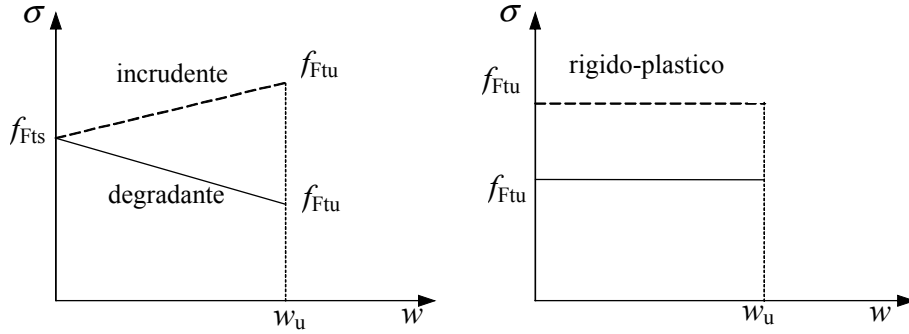


Figura 2-4 – Legami costitutivi semplificati tensione-apertura della fessura.

- (10) I valori tensionali, f_{Fts} e f_{Ftu} , che caratterizzano i due modelli possono essere valutati con le modalità riportate in Appendice A.
- (11) Ai fini della definizione del legame costitutivo, per materiali con comportamento degradante il valore ultimo dell'apertura della fessura, w_u , non può superare il valore massimo di 3 mm, nel caso di elementi inflessi, e di 1.5 mm, nel caso di elementi tesi.
- (12) Per materiali con comportamento incrudente, in presenza quindi di multifessurazione, non è necessario determinare l'apertura delle fessure in quanto è possibile operare direttamente in termini di tensioni e deformazioni come di seguito specificato.
- (13) In alternativa si può ricorrere a modelli più complessi presenti in letteratura purché opportunamente giustificati.

2.5.2.3 Legame costitutivo in termini di tensione-deformazione

I legami finora introdotti sono espressi in termini di tensione-apertura della fessura.

- (1) Per materiali con comportamento degradante la definizione del legame tensione-deformazione si basa sulla identificazione dell'ampiezza di apertura della fessura con la variazione di lunghezza di una opportuna base, l_{cs} , caratteristica dell'elemento strutturale. La deformazione è, quindi, assunta pari a:

$$\varepsilon = w / l_{cs}. \quad (2.4)$$

In presenza di armatura tradizionale la lunghezza caratteristica, l_{cs} , può essere valutata a partire dalle seguenti relazioni:

$$l_{cs} = \min \{s_{rm}, y\}, \quad (2.5)$$

$$s_{rm} = \xi \cdot \left(50 + 0.25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\phi}{\rho} \right) \quad [\text{lunghezze in mm}], \quad (2.6)$$

dove:

- s_{rm} è il valor medio della distanza tra le fessure;

- y è la distanza dell'asse neutro dal bordo teso della sezione valutata in fase elastica fessurata trascurando la resistenza a trazione del fibrorinforzato;
- ξ è un coefficiente adimensionale da assumersi pari a 1.0 per $l_f / d_f < 50$, pari a $50 \cdot d_f / l_f$ per $50 \leq l_f / d_f \leq 100$ e pari a $1/2$ per $l_f / d_f > 100$;
- d_f è il diametro delle fibre;
- l_f è la lunghezza delle fibre;
- ϕ è il diametro delle barre d'armatura (nel caso di diametri diversi, ϕ è pari alla loro media pesata);
- k_1 è un coefficiente pari a 0.8 per barre nervate di armatura e pari a 1.6 per barre lisce;
- k_2 è un coefficiente pari a 0.5 per flessione semplice o composta con $y \leq h$ e pari a 1.0 per trazione o per flessione composta con $y > h$;
- h è l'altezza della sezione;
- ρ è il rapporto geometrico tra l'area delle armature e l'area della parte tesa della sezione, individuata dalla distanza y .

Nel caso di sezioni senza armature tradizionali soggette a flessione, tensoflessione o pressoflessione con risultante esterna alla sezione stessa, la quantità s_{rm} è assunta pari all'altezza della sezione.

(2) La modalità sopra indicata per valutare la lunghezza caratteristica è relativa a modelli di trave con sezione piana.

Per differenti modelli cinematici (ad esempio il modello conseguente all'impiego di Elementi Finiti), occorre ridefinire tale modalità, coerentemente con il particolare modello scelto.

(3) Nel caso di materiale con comportamento incrudente, la fessurazione si manifesta in modo diffuso e, pertanto, può essere adottata una deformazione media, valutabile direttamente dalle prove sperimentali per l'identificazione dei parametri costitutivi. Il valore della deformazione ultima si assume pari all'1%.

(4) In definitiva, in termini di tensioni e deformazioni, il comportamento a trazione può essere schematizzato come illustrato in Figura 2-5, con i parametri definiti nell'Appendice A.

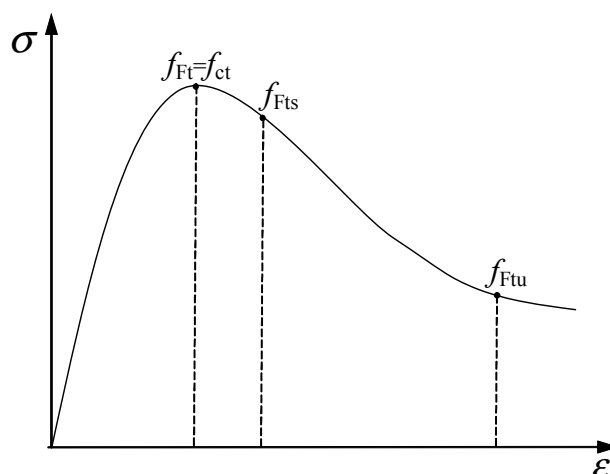


Figura 2-5 – Legame sforzo-deformazione.

(5) Si può far ricorso ai modelli semplificati di Figura 2-6, corrispondenti ai legami tensione – apertura di fessura di Figura 2-4.

Il primo legame è basato sulle resistenze residue equivalenti di esercizio ed ultima.

Il legame rigido-plastico è basato su una opportuna valutazione della resistenza residua equivalente ultima.

I legami semplificati riguardano solo le resistenze residue post-fessurative.

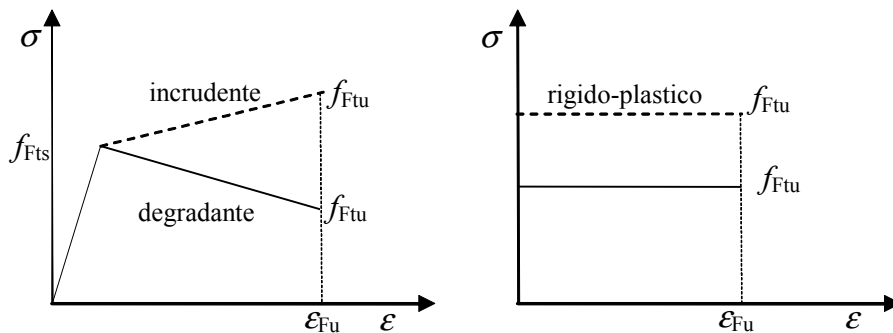


Figura 2-6 – Legami costitutivi semplificati tensione-deformazione.

2.5.2.4 Modulo di elasticità

(1) Il valore del modulo di elasticità è generalmente poco influenzato dalle fibre e, pertanto, può essere assunto pari a quello della matrice.

2.5.3 Proprietà fisiche del calcestruzzo indurito

2.5.3.1 Ritiro idraulico

(1) La presenza di fibre riduce l'ampiezza delle fessure da ritiro idraulico.

2.5.3.2 Resistenza al gelo

(1) La resistenza del calcestruzzo a cicli di gelo/disgelo non è alterata in misura rilevante dall'impiego di rinforzi fibrosi; lo stesso vale anche in presenza di sali disgelanti, non essendo stata riscontrata una significativa dipendenza dei fenomeni di scagliatura superficiale dalla presenza delle fibre nel materiale.

2.5.3.3 Penetrazione di ioni aggressivi

(1) Allo stato attuale delle conoscenze non è ben noto l'effetto del rinforzo fibroso sui fenomeni diffusivi nel calcestruzzo. In generale, per calcestruzzi di buona qualità, il rinforzo fibroso non influenza significativamente il trasporto di ioni aggressivi.

2.5.3.4 Carbonatazione

(1) La presenza di fibre non sembra influenzare significativamente il fenomeno della carbonatazione dal momento che non sono stati rilevati incrementi della profondità del fronte di avanzamento della CO_2 .

2.5.3.5 Ossidazione delle fibre

(1) In presenza di fibre di acciaio, possono verificarsi affioramenti localizzati di ossidi di ferro. L'effetto ha una valenza meramente estetica e può essere evitato proteggendo le fibre con trattamento di zincatura o utilizzando fibre di acciaio inox.

2.5.3.6 Comportamento al fuoco

(1) L'esperienza finora acquisita sul comportamento al fuoco dei calcestruzzi rinforzati con fibre di acciaio ha consentito di formulare le seguenti considerazioni.

- Basse percentuali di fibre (sino all'1%) non alterano significativamente la diffusività termica, che rimane dunque calcolabile sulla base dei dati disponibili per la matrice.
- Il danneggiamento provocato nel materiale da un ciclo termico spinto fino a 800 °C risulta prevalentemente correlato alla massima temperatura raggiunta nel ciclo e produce un effetto irreversibile sulla matrice. Tale comportamento, rilevato prevalentemente in presenza di limitate frazioni volumetriche di fibre metalliche, suggerisce, una volta ripristinata la temperatura ambiente, di apprezzare il degrado indotto attraverso la valutazione della resistenza residua.
- Al variare della temperatura massima di esposizione, la resistenza di prima fessurazione risulta tendenzialmente allineata con quella della matrice. Per temperature superiori ai 600 °C, le fibre migliorano il comportamento della matrice.
- Al variare della temperatura massima di esposizione, il modulo di elasticità dei calcestruzzi fibrorinforzati non risulta influenzato significativamente dalla presenza di limitate frazioni volumetriche ($\leq 1\%$) di fibre e, pertanto, può essere assimilato a quello della matrice.

(2) La presenza di fibre di polipropilene risulta efficace per limitare gli effetti di *spalling* distruttivo. In particolare, tali fibre sublimano parzialmente ad una temperatura di 170 °C lasciando cavità libere nella matrice. Una frazione volumetrica di fibre compresa tra lo 0.1% e lo 0.25% è in grado di mitigare significativamente o di eliminare il fenomeno.

2.6 ACCIAIO

(1)P Per le barre di armatura, le proprietà dell'acciaio e le competenti relazioni costitutive devono corrispondere a quelle prescritte nella Normativa vigente.

3 CONCETTI BASILARI DEL PROGETTO E PROBLEMI SPECIALI

3.1 GENERALITA'

(1)P Formano oggetto del presente capitolo le strutture di calcestruzzo fibrorinforzato, in presenza o assenza di armature metalliche.

(2)P Il progetto deve soddisfare requisiti di resistenza ed esercizio per l'intera vita attesa della struttura fibrorinforzata.

(3) L'utilizzo per scopi strutturali di calcestruzzo fibrorinforzato con comportamento degradante è consentito purché sia rispettato il seguente rapporto:

$$f_{Ftsk}/f_{ctk} > 0.2. \quad (3.1)$$

(4) In tutte le strutture di calcestruzzo fibrorinforzato occorre garantire che sia soddisfatta la seguente relazione:

$$\alpha_u \geq 1.2 \cdot \alpha_1, \quad (3.2)$$

dove α_u rappresenta il carico massimo ed α_1 quello di prima fessurazione (valori indicativi di essi sono riportati in Appendice D).

In alternativa, è consentito di rispettare la limitazione meno restrittiva:

$$\alpha_u > \alpha_1, \quad (3.3)$$

purché il rapporto tra lo spostamento massimo e quello di prima fessurazione sia almeno pari a 5.

(5) Possono essere realizzati elementi strutturali di calcestruzzo fibrorinforzato in assenza di armatura tradizionale. Nel caso di elementi monodimensionali, oltre alle limitazioni di cui alle precedenti regole (3) e (4), il calcestruzzo fibrorinforzato deve esibire un comportamento incrudente a trazione che soddisfi le seguenti limitazioni:

- $(f_{Ftu}/f_{Fts})_k > 1.05$;
- $(f_{Ftu}/f_{Fts}) \geq 1$, relativamente alla singola prova.

3.2 REQUISITI FONDAMENTALI

(1)P Con le probabilità prescritte dalla Normativa vigente, il progetto della struttura di calcestruzzo fibrorinforzato deve soddisfare i seguenti requisiti fondamentali:

- la struttura deve rimanere idonea all'uso per il quale è stata progettata, tenendo nel dovuto conto la sua vita presunta ed il suo costo;

- la struttura deve essere in grado di sopportare tutte le azioni cui possa essere sottoposta durante la sua realizzazione e durante il suo esercizio;
- la struttura deve assicurare un'adeguata durabilità in relazione ai costi di manutenzione.

(2)P Inoltre, una struttura di FRC deve essere progettata in modo da evitare danni sproporzionati rispetto all'entità di azioni eccezionali quali esplosioni, urti o conseguenze di errori umani.

(3) Il danno potenziale deve, di regola, essere mitigato o evitato mediante il ricorso ad uno dei seguenti accorgimenti:

- evitando, riducendo o eliminando i rischi a cui la struttura viene esposta;
- scegliendo una forma strutturale poco sensibile ai rischi considerati;
- scegliendo uno schema strutturale che assicuri l'equilibrio anche nel caso eccezionale di assenza di una delle membrature.

(4)P I requisiti sopra definiti possono ritenersi soddisfatti se si garantisce:

- la scelta di materiali opportuni;
- un progetto adeguato con accorta cura di particolari costruttivi;
- la definizione di procedure di controllo per la produzione del calcestruzzo fibrorinforzato e per la progettazione ed esecuzione della struttura.

3.3 VITA UTILE DELLA STRUTTURA

(1) La vita utile della struttura è un requisito di progetto e deve essere definita in base alla destinazione d'uso.

3.4 PRINCIPI GENERALI DEL PROGETTO STRUTTURALE

3.4.1 Generalità

(1)P Le verifiche degli elementi fibrorinforzati devono essere condotte sia nei riguardi degli stati limite di esercizio (SLE), che nei riguardi dello stato limite ultimo (SLU), come definiti nella Normativa vigente.

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

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

$$E_d \leq R_d, \quad (3.4)$$

dove E_d ed R_d sono, rispettivamente, i valori di progetto del generico effetto preso in considerazione e della corrispondente resistenza nell'ambito dello stato limite esaminato.

(4) I valori di progetto si ricavano da quelli caratteristici attraverso opportuni coefficienti parziali, i cui valori, per i vari stati limite, sono quelli indicati nella Normativa vigente opportunamente integrati nel presente documento per quanto attiene alla resistenza a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato.

3.4.2 Azioni di progetto

(1) Le azioni di progetto da adottare nel progetto di elementi fibrorinforzati sono quelle indicate nella Normativa vigente.

3.4.3 Proprietà dei materiali

(1)P I valori delle proprietà dei materiali utilizzati nel progetto di strutture fibrorinforzate devono essere stati determinati mediante prove normalizzate di laboratorio, come quelle indicate nel Capitolo 2.

(2) Le proprietà meccaniche di resistenza e deformazione dei materiali sono quantificate dai corrispondenti valori caratteristici, così come definiti nel § 3.5.

(3) I soli parametri di rigidezza (moduli di elasticità) dei materiali sono valutati attraverso i corrispondenti valori medi.

(4) Il valore di progetto della generica proprietà di resistenza, X_d , può essere espresso in forma generale mediante una relazione del tipo:

$$X_d = \frac{X_k}{\gamma_m}, \quad (3.5)$$

dove X_k è il valore caratteristico della generica proprietà e γ_m è un coefficiente parziale del materiale.

3.4.4 Capacità resistente di progetto

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

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R\{X_{d,i}; a_{d,i}\} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R \cdot \left\{ \frac{X_{k,i}}{\gamma_{m,i}}; a_{d,i} \right\}, \quad (3.6)$$

dove $R\{\cdot\}$ è una opportuna funzione riconducibile allo specifico modello meccanico considerato (ad esempio quello per la flessione, per il taglio) e γ_{Rd} è un coefficiente parziale che tiene conto delle incertezze insite nel modello. Come argomenti della funzione $R\{\cdot\}$ figurano, in generale, parametri meccanici e geometrici, di cui $X_{d,i}$ e $a_{d,i}$ sono, rispettivamente i valori di progetto e nominali; γ_m è il coefficiente parziale del materiale.

3.5 VALORI CARATTERISTICI DELLE RESISTENZE

(1) Il valore caratteristico della resistenza a compressione, f_F , deve essere calcolato come suggerito dalla Normativa vigente per il materiale costituente la matrice.

(2)P Il valore caratteristico della resistenza a trazione, f_{Ftk} , dipende dalla struttura oltre che dalle prove eseguite su campioni.

(3) Il valore caratteristico della resistenza a trazione, f_{Ftk} , può essere determinato a partire da quello medio, f_{Ftm} , come:

$$f_{Ftk} = f_{Ftm} - \alpha \cdot k \cdot s, \quad (3.7)$$

dove s è lo scarto quadratico medio e k un coefficiente funzione del numero di provini.

Il coefficiente α può tener conto degli effetti di iperstaticità strutturale, come riportato in Appendice D.

Valori tipici di α e k sono riportati in Appendice D.

3.6 COEFFICIENTI PARZIALI

3.6.1 Coefficienti parziali dei materiali

(1) Per gli stati limite ultimi, possibili valori da attribuire ai coefficienti parziali sono riportati in Tabella 3-1.

(2) Per gli stati limite di esercizio, si suggerisce di attribuire un valore unitario a tutti i coefficienti parziali.

Tabella 3-1 – Coefficienti parziali.

Materiale	Applicazioni di tipo A ⁽¹⁾	Applicazioni di tipo B ⁽²⁾
calcestruzzo fibrorinforzato in compressione	come prescritto dalla Normativa vigente (in assenza di fibre)	come prescritto dalla Normativa vigente (in assenza di fibre)
calcestruzzo fibrorinforzato in trazione non fessurato	come prescritto dalla Normativa vigente (in assenza di fibre)	come prescritto dalla Normativa vigente (in assenza di fibre)
calcestruzzo fibrorinforzato in trazione fessurato (resistenze residue)	$\gamma_F = 1.5$	$\gamma_F = 1.3$
acciaio	come prescritto dalla Normativa vigente	come prescritto dalla Normativa vigente

(1) Controllo di qualità ordinario sul materiale; resistenze ottenute con prove standard nominali (Appendice B).

(2) Elevato controllo di qualità sul materiale e su elementi strutturali; resistenze ottenute con prove strutturali specifiche (Appendice B).

Nota: i valori dei coefficienti parziali del calcestruzzo fibrorinforzato a trazione, γ_F , risultano inferiori di quelli relativi al calcestruzzo in compressione, γ_c , poiché non sono applicati al valore di picco, ma ad un valore di resistenza residuo.

3.6.2 Coefficienti parziali γ_{Rd} per i modelli di resistenza

(1) Per gli stati limite ultimi, con riferimento ai modelli di resistenza riportati nel Capitolo 4, si suggerisce di attribuire un valore unitario ai coefficienti parziali di meccanismo, γ_{Rd} .

3.7 REQUISITI DI DURABILITA'

(1) Per assicurare durabilità alla struttura di calcestruzzo fibrorinforzato vanno tenuti in debito conto:

- l'uso previsto della struttura;
- le condizioni ambientali attese;
- la composizione, le proprietà e le prestazioni dei materiali componenti (matrici, fibre, acciaio);
- i particolari costruttivi;
- il livello di controllo;

- particolari misure protettive, ad esempio nei confronti del fuoco;
- la manutenzione attesa durante la vita utile.

(2) Per quanto concerne i requisiti generali di durabilità degli elementi strutturali di calcestruzzo fibrorinforzato ed i relativi criteri di progettazione ed esecuzione si applica quanto prescritto nella norma UNI EN 12390-8 (profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione).

(3) Vengono considerate le seguenti classi di esposizione (UNI EN 206-1):

- X0: assenza di rischio di corrosione o attacco (per calcestruzzo in ambiente molto asciutto);
- XC: corrosione indotta da carbonatazione;
- XD: corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare;
- XS: corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare;
- XF: attacco dei cicli gelo/disgelo con o senza sali disgelanti;
- XA: attacco chimico.

(4) Raccomandazioni per la scelta del tipo di fibra in relazione alle classi di esposizione e alla matrice di calcestruzzo sono fornite in Tabella 3-2, limitatamente alle fibre di acciaio.

Le fibre possono essere classificate per il tramite di una sigla distintiva, costituita da una lettera seguita da un numero.

In particolare, con la lettera si identifica il processo di produzione della fibra (§ 2.2):

- A: da filo trafilato;
- B: da lamiera tagliata;
- C: da altre fabbricazioni.

Con il numero si identifica invece la composizione chimica della fibra:

- 1: basso contenuto di carbonio;
- 2: alto contenuto di carbonio;
- 3: inox.

La sigla ST indica l'eventuale presenza di trattamento superficiale.

Tabella 3-2 – Raccomandazioni nella scelta delle fibre di acciaio in funzione della classe di esposizione e del tipo di calcestruzzo.

		Classi di esposizione																		
		Nessun rischio di corrosione o attacco	Corrosione da carbonatazione					Corrosione da cloruri						Attacco gelo/disgelo				Ambienti chimici aggressivi		
								Altri cloruri (diversi dall'acqua di mare)			Acqua marina									
			Tipo di calcestruzzo	Tipo di fibra	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1
C1	A3-B3-C3	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	A1-B1-C1 ST	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-
	A1-B1-C1	SI	SI	SI	SI	-	SI	SI	-	SI	-	-	SI	SI	SI	-	-	-	-	-
	A2-B2-C2 ST	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	SI	SI	SI	SI	-	-	-
	A2-B2-C2	SI	SI	SI	-	-	SI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C2	A3-B3-C3	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-
	A1-B1-C1 ST	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	-
	A1-B1-C1	SI	SI	SI	SI	-	SI	SI	-	SI	-	-	SI	-	-	-	-	-	-	-
	A2-B2-C2 ST	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	SI	SI	-	SI	-	-	-	-	-	-
	A2-B2-C2	SI	SI	SI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C3	A3-B3-C3	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	SI	-	-	-	SI	-	-
	A1-B1-C1 ST	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A1-B1-C1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A2-B2-C2 ST	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A2-B2-C2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(5) Allo stato attuale delle conoscenze, non sono ancora disponibili indicazioni per fibre polimeriche e per fibre di carbonio.

(6) Per la classificazione della matrice si fa riferimento alla impermeabilità del calcestruzzo, valutata attraverso la prova di penetrazione dell'acqua in pressione secondo lo standard UNI ENV 206.

Le matrici possono essere distinte nelle seguenti classi:

- C1: se il valore massimo di penetrazione dell'acqua è inferiore a 20 mm ed in media non superiore a 10 mm;
- C2: se il valore massimo è inferiore a 50 mm ed in media non superiore a 20 mm;
- C3: per gli altri casi.

(7) L'adozione progettuale delle raccomandazioni della Tabella 3-2 garantisce la realizzazione di elementi strutturali durevoli sulla base di una vita attesa di almeno 50 anni, in condizioni ordinarie di manutenzione.

(8) Qualora si considerino combinazioni diverse da quelle indicate o una vita attesa più lunga, il progettista è tenuto a motivare in modo circostanziato le scelte operate con riferimento allo specifico progetto. Di regola, in tali casi deve essere considerata, nel calcolo progettuale, una sezione ridotta (da valutarsi caso per caso) di almeno 1 cm, per ogni fronte esposto ad attacco, rispetto alle misure realizzate in opera.

(9) Negli elementi strutturali realizzati con calcestruzzo fibrorinforzato l'ampiezza delle fessure è limitata dall'introduzione delle fibre nella matrice. I valori del copriferro netto possono anche essere opportunamente ridotti, rispetto a quelli indicati dalla Normativa vigente per le strutture di calcestruzzo non fibrorinforzato, così come indicato al § 6.3.2(2).

(10) L'utilizzo di fibre di polietilene o di polivinilcol con frazione volumetrica superiore al 2% assicura valori ridotti dell'ampiezza delle fessure ($\leq 60 \mu\text{m}$) anche per valori elevati di deformazione ($\approx 1\%$). Per tali ampiezze di fessurazione, ai fini della durabilità, il calcestruzzo può essere considerato non fessurato.

4 VERIFICA DI RESISTENZA ALLO STATO LIMITE ULTIMO

4.1 STATO LIMITE ULTIMO PER ELEMENTI MONODIMENSIONALI

4.1.1 Generalità

(1)P Il progetto allo SLU di elementi trave soggetti a flessione richiede la valutazione del momento resistente ultimo ed il confronto con il momento di progetto.

(2)P Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU di sezioni di calcestruzzo fibrorinforzato sono le seguenti:

- conservazione della condizione di sezioni piane fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra calcestruzzo fibrorinforzato ed armatura metallica di rinforzo (se presente);
- legame costitutivo del calcestruzzo fibrorinforzato del tipo specificato nei §§ 2.5.2.1 e 2.5.2.3;
- legame costitutivo delle barre d'armatura di acciaio (se presenti) conforme alla Normativa vigente.

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

- raggiungimento della massima deformazione di compressione, ϵ_{cu} , nel calcestruzzo fibrorinforzato;
- raggiungimento della massima deformazione di trazione, ϵ_{su} , nell'acciaio d'armatura (se presente);
- raggiungimento della massima deformazione di trazione, ϵ_{Fu} , nel calcestruzzo fibrorinforzato.

Nel caso di legame costitutivo di tipo degradante, la massima deformazione di trazione, ϵ_{Fu} , è assunta pari al 2%. Il valore ultimo dell'apertura di fessura, w_u , deve comunque soddisfare la limitazione: $w_u = \epsilon_u \cdot l_{cs} \leq 3 \text{ mm}$.

Il concomitante valore di tensione (nel ramo post-fessurazione del legame costitutivo) è assunto come valore della tensione residua ultima.

Nel caso di legame costitutivo di tipo incrudente, la deformazione massima di trazione, ϵ_{Fu} , è assunta pari all'1%.

4.1.2 Pressoflessione

(1) Per un assegnato valore di progetto dello sforzo normale sollecitante, N_{Sd} , il momento ultimo, M_{Rd} , è valutabile mediante le equazioni di equilibrio alla traslazione e alla rotazione.

(2) La determinazione del momento ultimo può essere effettuata con riferimento alle distribuzioni di deformazione e di tensione riportate nella Figura 4-1, corrispondenti ai legami costitutivi del calcestruzzo fibrorinforzato di cui ai §§ 2.5.2.1 e 2.5.2.3 e dell'acciaio di armatura (se presente) in accordo con la Normativa vigente.

(3) Con riferimento alla situazione riportata in Figura 4-1 in accordo con quanto previsto dall'Eurocodice 2 (EC2), la valutazione del momento ultimo per un assegnato sforzo normale resistente può eventualmente essere effettuata sulla base di legami costitutivi semplificati (legami corrispondenti alla massima tensione di compressione e alla tensione di post-fessurazione a trazione, vedere § 2.5.2.3), verificando *a posteriori* che non siano violate le deformazioni ultime ε_{cu} , ε_{su} ed ε_{Fu} dei materiali e, nel contempo, la modalità di rottura.

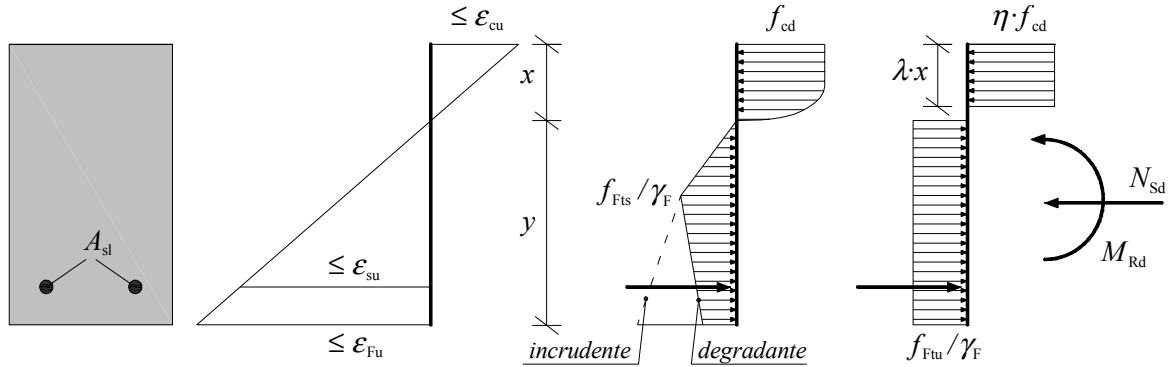


Figura 4-1 – Stato limite ultimo per pressoflessione: utilizzo dei legami semplificati (*stress-block* con coefficienti η e λ secondo EC2).

4.1.3 Taglio

4.1.3.1 Generalità

Per le verifiche allo SLU sotto sollecitazione tagliante, gli elementi monodimensionali (travi) devono rispettare le prescrizioni di cui ai paragrafi successivi.

4.1.3.2 Metodo di calcolo a taglio di travi in assenza di armatura longitudinale e trasversale convenzionale

(1)P Nel caso di elementi caratterizzati da materiale con comportamento a trazione incrudente e in assenza di armature longitudinali e trasversali convenzionali, la tensione principale di trazione, σ_1 , non può superare il valore della resistenza ultima di progetto a trazione:

$$\sigma_1 \leq \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_F} \quad (4.1)$$

(2)P Nel caso di elementi caratterizzati da materiale con comportamento a trazione degradante non è ammessa la realizzazione di travi prive di armatura longitudinale e trasversale convenzionale.

4.1.3.3 Metodo di calcolo a taglio di travi con armatura longitudinale tradizionale e in assenza di armatura trasversale convenzionale

(1)P Il valore di progetto della resistenza a taglio di elementi con armatura longitudinale convenzionale, in assenza di armatura trasversale convenzionale, è fornito dalla seguente relazione:

$$V_{Rd,F} = \left\{ \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho_1 \cdot \left(1 + 7.5 \cdot \frac{f_{Ftuk}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{\frac{1}{3}} + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \quad [\text{tensioni in MPa}] \quad (4.2)$$

Nella (4.2):

- γ_c è il coefficiente parziale del calcestruzzo in compressione in assenza di fibre;
- k è un fattore che tiene conto dell'effetto scala ed è pari a $1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0$;
- d è l'altezza utile della sezione;
- ρ_l è la percentuale di armatura ancorata al lembo teso nella sezione considerata per la verifica, da assumersi pari a: $\rho_l = A_{sl}/b_w d \leq 0.02$;
- A_{sl} è l'area dell'armatura tesa sufficientemente ancorata oltre la sezione considerata per la verifica;
- f_{Ftuk} è il valore caratteristico della resistenza residua ultima a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato, avendo considerato $w_u = 1.5$ mm (vedere Appendice A);
- f_{ctk} è il valore caratteristico della resistenza a trazione della matrice come definita dalla Normativa vigente;
- f_{ck} è il valore caratteristico della resistenza cilindrica a compressione come definita dalla Normativa vigente;
- $\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c$ è la tensione media agente sulla sezione trasversale di solo calcestruzzo, A_c , per effetto dell'azione assiale N_{Ed} dovuta al carico esterno o alla precompressione (da considerarsi positiva se di compressione);
- b_w è la più piccola corda nella parte tesa della sezione trasversale dell'elemento.

Il valore della resistenza a taglio, $V_{Rd,F}$, viene assunto non inferiore a quello minimo, $V_{Rd,Fmin}$, definito dalla seguente relazione:

$$V_{Rd,Fmin} = (v_{min} + 0.15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d, \quad (4.3)$$

essendo v_{min} un coefficiente pari a $0.035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$.

(2) Per elementi strutturali caricati in sommità (carichi non appesi), ad una distanza, a , dall'appoggio (luce di taglio) compresa tra $0.5 \cdot d$ e $2 \cdot d$, il taglio sollecitante può essere ridotto secondo il coefficiente $\beta = a/(2 \cdot d)$. Tale procedura può essere applicata solo se le armature longitudinali sono efficacemente ancorate in corrispondenza dell'appoggio considerato. Nel caso $a < 0.5 \cdot d$, si assume $a = 0.5 \cdot d$.

(3) In presenza di carichi concentrati vicini agli appoggi e in regioni diffusive, la verifica può essere eseguita con modelli del tipo puntone-tirante (*strut-and-tie*).

La massima resistenza a taglio non può eccedere la massima resistenza del puntone, $V_{Rd,max}$, definita al successivo § 4.1.3.4.

4.1.3.4 Metodo di calcolo a taglio di travi con armatura longitudinale e trasversale convenzionale

(1) La resistenza ultima a taglio del calcestruzzo fibrorinforzato, V_{Rd} , in presenza di armatura trasversale può essere valutata come somma del contributo a taglio dell'armatura d'anima, $V_{Rd,s}$, più quello del calcestruzzo fibrorinforzato, $V_{Rd,F}$:

$$V_{Rd} = V_{Rd,s} + V_{Rd,F}. \quad (4.4)$$

Il termine $V_{Rd,s}$ può essere calcolato come:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{p} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \psi + \cot \theta) \cdot \sin \psi, \quad (4.5)$$

dove:

- θ è l'angolo d'inclinazione della biella compressa rispetto all'asse della trave, che può essere assunto, in assenza di precompressione, pari a 45° ;
- ψ è l'angolo formato dall'armatura trasversale rispetto all'asse longitudinale della trave;
- z è il braccio della coppia interna, che può essere assunto pari a $0.9 \cdot d$;
- A_{sw} è l'area dell'armatura trasversale convenzionale;
- p è il passo dell'armatura trasversale convenzionale;
- f_{ywd} è la resistenza di progetto allo snervamento dell'acciaio dell'armatura trasversale.

Nell'equazione (4.5), l'area dell'armatura trasversale, A_{sw} , non può eccedere il seguente valore di soglia:

$$A_{sw,max} \leq \frac{0.5 \cdot \nu \cdot f_{cd} \cdot \sin \psi}{1 - \cos \psi} \cdot \frac{b_w \cdot p}{f_{ywd}}, \quad (4.6)$$

dove ν è un fattore di riduzione della resistenza a compressione in presenza di fessurazione da taglio, valutabile attraverso la seguente relazione:

$$\nu = 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \quad [f_{ck} \text{ in MPa}]. \quad (4.7)$$

In ogni caso, la resistenza a taglio non può superare quella massima offerta dal puntone compresso di calcestruzzo, $V_{Rd,max}$, definita come:

$$V_{Rd,max} = \frac{b_w \cdot z \cdot \nu \cdot f_{cd} \cdot (\cot \psi + \cot \theta)}{(1 + \cot^2 \theta)}. \quad (4.8)$$

4.1.3.5 Armatura minima a taglio

(1) E' consentito di non prevedere la presenza di armature trasversali convenzionali (staffe) qualora sia rispettata la seguente limitazione:

$$f_{Ftuk} \geq \frac{\sqrt{f_{ck}}}{20} \quad [f_{ck} \text{ in MPa}]. \quad (4.9)$$

Tale limitazione permette di contenere lo sviluppo e la diffusione della fessurazione inclinata e, pertanto, di garantire un'adequata duttilità alla struttura.

(2) Nel caso in cui la suddetta limitazione fosse violata, deve essere prevista un'armatura trasversale convenzionale (staffe) proporzionata in modo da garantire che la resistenza a taglio ultima risulti maggiore di quella di prima fessurazione, V_{cr} :

$$V_{cr} = 0.67 \cdot f_{ctk} \cdot b_w \cdot d. \quad (4.10)$$

L'aliquota di taglio da affidare alle staffe è dunque pari alla differenza:

$$V_{Rds,min} = V_{cr} - V_{Rd,F}. \quad (4.11)$$

(3) La distanza (longitudinale) tra le armature trasversali (ove presenti), s , non deve superare il valore di $0.8 \cdot d$.

(4) In presenza di un'elevata percentuale di armatura in zona compressa deve essere valutata l'opportunità di disporre staffe per evitare l'instabilità delle barre compresse.

4.1.4 Torsione

4.1.4.1 Metodo di calcolo a torsione di travi in assenza di armatura longitudinale e trasversale convenzionale

(1)P Nel caso di elementi caratterizzati da materiale con comportamento a trazione incoerente e in assenza di armature longitudinali e trasversali convenzionali, la tensione principale di trazione, σ_1 , non deve superare il valore della resistenza ultima di progetto a trazione:

$$\sigma_1 \leq \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_F}. \quad (4.12)$$

4.1.4.2 Metodo di calcolo a torsione di travi con armatura longitudinale e trasversale convenzionale

(1) Nel caso di elementi con armature longitudinali e trasversali convenzionali, il contributo delle fibre può essere tenuto in conto sulla base di opportune modellazioni.

4.2 ELEMENTI LASTRA

4.2.1 Elementi senza armatura convenzionale

(1) Per elementi bidimensionali piani di materiale fibrorinforzato caricati nel piano medio (lastre) (Figura 4-2), la verifica di resistenza si effettua con riferimento agli sforzi normali, n_x e n_y , nonché a quelli tangenziali, n_{xy} , assunti positivi se diretti come indicato in Figura 4-2.

I competenti sforzi normali principali, n_1 ed n_2 ($< n_1$), positivi se di trazione, possono essere determinati mediante le seguenti relazioni:

$$n_1 = \frac{1}{2} \cdot \left[(n_x + n_y) + \sqrt{(n_x - n_y)^2 + 4 \cdot n_{xy}^2} \right], \quad (4.13)$$

$$n_2 = \frac{1}{2} \cdot \left[(n_x + n_y) - \sqrt{(n_x - n_y)^2 + 4 \cdot n_{xy}^2} \right]. \quad (4.14)$$

La verifica di resistenza, per $n_1 \geq 0$, consiste nell'accertare che siano soddisfatte le seguenti limitazioni:

$$n_1 \leq f_{Ftud} \cdot t \quad \text{per} \quad (-0.3 \cdot f_{Fd} \cdot t) \leq n_2 \leq (f_{Ftud} \cdot t), \quad (4.15)$$

$$n_1 \leq f_{\text{Ftud}} \cdot \left(\frac{f_{\text{Fd}} \cdot t + n_2}{0.7 \cdot f_{\text{Fd}}} \right) \quad \text{per } (-f_{\text{Fd}} \cdot t) \leq n_2 \leq (-0.3 \cdot f_{\text{Fd}} \cdot t), \quad (4.16)$$

essendo:

$$f_{\text{Ftud}} = \frac{f_{\text{Ftuk}}}{\gamma_F}; \quad f_{\text{Fd}} = \frac{f_{\text{ck}}}{\gamma_c}. \quad (4.17)$$

Per $n_1 < 0$, la verifica di resistenza si particolarizza nella forma:

$$-f_{\text{Fd}} \cdot t \leq n_2 \leq n_1 \leq 0. \quad (4.18)$$

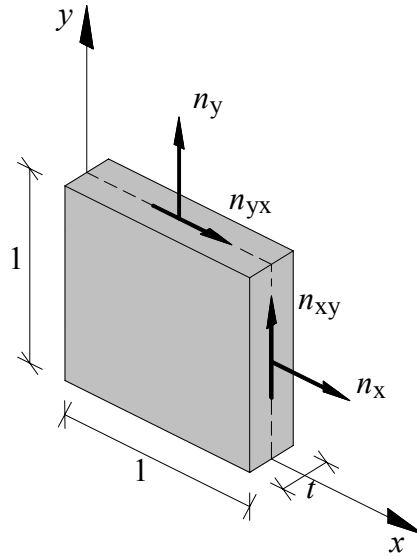


Figura 4-2 – Stato piano di sforzo.

(2) In tutti i casi in cui vengano impiegati materiali con comportamento incrudente è richiesta la verifica agli SLE.

4.2.2 Elementi con armatura convenzionale

(1) Per elementi lastre di calcestruzzo fibrorinforzato, definiti come al § 4.2.1 e provvisti di un'orditura di armature ortogonali disposte lungo gli assi x e y (Figura 4-2) e di aree per unità di larghezza, rispettivamente, a_{sx} e a_{sy} , la verifica di resistenza consiste nell'accertare che siano soddisfatte le seguenti limitazioni:

$$\left(-a_{sx} \cdot f_{sd} - f_{\text{Fd}} \cdot t + \frac{n_{xy}}{\lambda} \right) \leq n_x \leq \left(a_{sx} \cdot f_{sd} + f_{\text{Ftud}} \cdot t - n_{xy} \cdot \lambda \right), \quad (4.19)$$

$$\left(-a_{sy} \cdot f_{sd} - f_{\text{Fd}} \cdot t + n_{xy} \cdot \lambda \right) \leq n_y \leq \left(a_{sy} \cdot f_{sd} + f_{\text{Ftud}} \cdot t - \frac{n_{xy}}{\lambda} \right), \quad (4.20)$$

$$|n_{xy}| \leq \frac{(f_{\text{Fd}} + f_{\text{Ftud}}) \cdot t \cdot |\lambda|}{1 + \lambda^2}, \quad (4.21)$$

dove, assumendo $n_x > n_y$, si è posto:

$$\lambda = \frac{2 \cdot n_{xy}}{\sqrt{(n_x - n_y)^2 + 4 \cdot n_{xy}^2} - (n_x - n_y)} \quad (4.22)$$

4.3 ELEMENTI PIASTRA

4.3.1 Elementi senza armatura convenzionale

(1) Per elementi piastra senza armatura convenzionale (Figura 4-3) soggetti a prevalenti sforzi di flessione, la verifica di resistenza può essere effettuata con riferimento al momento resistente, m_{Rd} , valutato ipotizzando il legame costitutivo rigido-plastico (Figura 2-4):

$$m_{Rd} = \frac{f_{tud} \cdot t^2}{2} \quad (4.23)$$

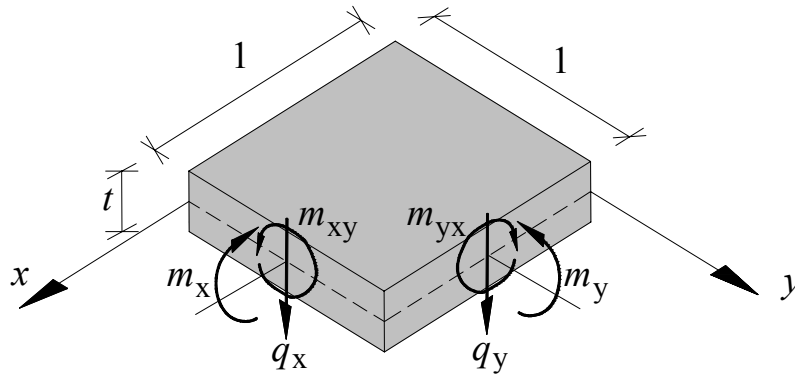


Figura 4-3 – Elemento di piastra inflessa

(2) Nel caso di azione contemporanea di due momenti flettenti m_x e m_y agenti in direzioni ortogonali, la verifica allo SLU richiede il soddisfacimento della limitazione:

$$\left(\frac{m_x}{m_{Rd}} \right)^2 + \left(\frac{m_y}{m_{Rd}} \right)^2 \leq 1. \quad (4.24)$$

(3) Qualora si desideri tenere in conto il contributo fornito dalla iperstaticità strutturale, indispensabile per comportamenti flessionali degradanti, si può operare con metodi di analisi non lineare (analisi limite o non lineare evolutiva).

4.3.2 Elementi con armatura convenzionale

(1) La verifica di elementi di calcestruzzo fibrorinforzato con armatura convenzionale può essere eseguita con metodi di analisi non lineare (analisi limite, analisi non lineare evolutiva).

5 STATO LIMITE DI ESERCIZIO

5.1 VERIFICA DELLE TENSIONI

- (1) La verifica delle tensioni di compressione in esercizio deve essere eseguita in accordo con la Normativa vigente.
- (2) Nel caso di elementi strutturali realizzati con materiali degradanti, la verifica delle tensioni di trazione in esercizio è implicitamente soddisfatta se l'elemento è verificato allo SLU.
- (3) Nel caso di elementi strutturali realizzati con materiali incrudenti, deve essere eseguita la verifica delle tensioni di trazione in esercizio imponendo il soddisfacimento della limitazione:

$$\sigma_t \leq 0.6 \cdot f_{tuk}. \quad (5.1)$$

5.2 APERTURA DELLE FESSURE

- (1) L'ampiezza caratteristica delle fessure, w_k , in elementi di calcestruzzo fibrorinforzato, può essere valutata utilizzando la seguente relazione:

$$w_k = \beta \cdot s_{rm} \cdot \varepsilon_{sm}, \quad (5.2)$$

dove:

- s_{rm} è la distanza media finale tra le fessure calcolata con l'equazione (2.6);
 - ε_{sm} è la deformazione media nell'acciaio che, in accordo alla Normativa vigente, tiene conto, nella condizione di carico considerata, degli effetti di *tension stiffening*, di ritiro, ecc.;
 - β è un coefficiente che correla l'ampiezza media delle fessure al valore di progetto, i cui valori possono essere dedotti dalla Normativa vigente con riferimento ai calcestruzzi non fibrorinforzati.
- (2) Nella valutazione di ε_{sm} si può tener conto della resistenza a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato ed assumere, lungo la zona tesa della sezione trasversale, una distribuzione costante di tensioni pari a f_{Ftsk} .

5.3 ARMATURA MINIMA PER IL CONTROLLO DELLA FESSURAZIONE

- (1) Per governare la fessurazione, negli elementi inflessi è necessario prevedere un'armatura minima di area non inferiore a:

$$A_{s,min} = \left(k_c \cdot k_s \cdot k_p \cdot f_{ctm} - f_{Ftsm} \right) \cdot \frac{A_{ct}}{\sigma_s}, \quad (5.3)$$

dove:

- f_{ctm} è il valore medio della resistenza a trazione della matrice;
- f_{Ftsm} è il valore medio della resistenza residua di esercizio del fibrorinforzato;
- A_{ct} è l'area di calcestruzzo della sezione soggetta a trazione, determinata assumendo uno stato di sforzo al limite elastico;

- σ_s è la massima tensione ammissibile nell'armatura in fase fessurata, da potersi assumere pari alla tensione di snervamento dell'acciaio;
 - k_c , k_s , k_p sono dei coefficienti correttivi i cui valori sono definiti nell'EC2.
- (2) Nel caso in cui $A_{s,min}$ risulti negativa, l'armatura minima può essere costituita unicamente da rinforzo fibroso.

6 ESECUZIONE

Nel seguito sono riportate le indicazioni specifiche per l'esecuzione degli elementi strutturali di calcestruzzo fibrorinforzato.

6.1 COMPOSIZIONE DELLA MISCELA

- (1) La scelta dei componenti e del loro dosaggio nella miscela, oltre che con riferimento alle proprietà meccaniche di resistenza attese per il calcestruzzo fibrorinforzato indurito, può essere fatta con riferimento al tipo ed alla geometria specifica dell'elemento strutturale da realizzare.
- (2) In particolare, la lunghezza delle fibre e la dimensione massima dell'aggregato devono essere correlate tra loro per garantire una uniforme ed efficiente distribuzione delle fibre. A tal fine la dimensione massima dell'aggregato non deve essere superiore a 0.5 volte la lunghezza delle fibre.
- (3) Per ridurre il rischio di una eventuale agglomerazione di fibre, per l'aggregato deve essere adottata una granulometria continua.
- (4) Per assicurare una completa ed uniforme distribuzione delle fibre, la loro lunghezza va correlata alle dimensioni minime (spessori) dell'elemento strutturale da realizzare.

6.2 POSA DELLE ARMATURE

- (1) Per quanto concerne l'assemblaggio ed il posizionamento delle armature tradizionali si deve procedere nel rispetto della Normativa vigente.
- (2) Particolare attenzione va posta alla presenza di armature ortogonali alla direzione del getto, le quali possono ostacolare il regolare flusso del calcestruzzo fresco all'interno della cassaforma. Prevedendo tale eventualità già in fase di progettazione, occorre evitare che tali impedimenti compromettano l'omogeneità di distribuzione delle fibre.

6.3 DIMENSIONI MINIME

Salvo particolari specifiche, le dimensioni minime dello spessore dell'elemento strutturale da realizzare, t , e dell'interferro, i , sono definite in funzione della lunghezza della fibra, l_f , della dimensione massima dell'aggregato, d_a , e del diametro di armatura, ϕ , come di seguito specificato. Il valore minimo del copriferro netto è correlato a quello previsto dalla Normativa vigente per le strutture di calcestruzzo non fibrorinforzato.

6.3.1 Spessore minimo relativo

- (1) Lo spessore minimo dell'elemento strutturale, t , va definito nel rispetto delle seguenti limitazioni:
 - valore minimo locale: $t \geq 2.0 \cdot d_a$;
 - sezioni senza armatura o con unico strato di armatura: $t \geq 2.4 \cdot d_a$;
 - sezioni con più strati di armatura: $t \geq 4.0 \cdot d_a$.

6.3.2 Spaziatura di armatura e copriferro minimi

(1) I valori minimi della spaziatura netta tra le barre, al variare del tipo di armatura, sono riportati in Tabella 6-1.

Tabella 6-1 – Valori minimi dell'interferro al variare del tipo di armatura.

Tipo di armatura	Interferro netto
staffe e reti	$\geq 1.6 \cdot d_a$
	$\geq 0.8 \cdot l_f$
barre	$\geq 1.0 \cdot d_a$
	$\geq 1.0 \cdot \phi$
	$\geq 0.8 \cdot l_f$
cavi pretesi	$\geq 1.2 \cdot d_a$
	$\geq 2.0 \cdot \phi$
	$\geq 1.0 \cdot l_f$

(2) Il valore minimo del copriferro netto per le barre di armatura in elementi di calcestruzzo fibrorinforzato può essere assunto pari all'80% dell'analogo valore indicato nella Normativa vigente per le strutture di calcestruzzo armato ordinario.

6.4 ESECUZIONE DEI GETTI

(1) Per quanto concerne le specifiche delle casseforme e dei loro trattamenti superficiali, dei sistemi di supporto e delle fondazioni, si deve fare riferimento alla Normativa vigente.

(2) Il calcestruzzo fibrorinforzato deve essere prodotto seguendo le stesse modalità di confezione dei conglomerati cementizi ordinari ad eccezione di quanto deriva dall'introduzione delle fibre.

(3) Al fine di garantire l'uniformità dell'impasto, si deve valutare, in funzione delle esigenze specifiche, lo stato delle fibre (sfuse, impacchettate con colle idrosolubili) prima del loro inserimento nella matrice. In particolari situazioni può risultare necessario l'uso di sistemi per la setacciatura delle stesse (sbrogliatori).

(4) L'impasto fresco deve essere posato in modo che ne sia garantita una buona compattazione e omogeneità, affinché le sue caratteristiche nominali e strutturali di progetto possano essere attinte. Si deve pertanto porre attenzione alla durata di una eventuale vibrazione ed alla modalità di esecuzione (a banco, esterna), al fine di evitare la segregazione delle fibre, che comprometterebbe la loro uniforme distribuzione.

(5) Particolare cura deve essere posta in corrispondenza delle armature, degli inserti, dei volumi ridotti e delle riprese di getto.

7 RESISTENZA AL FUOCO

(1) Per la determinazione della capacità portante di elementi strutturali di calcestruzzo fibrorinforzato, R , soggetti a carico d'incendio, si possono adottare sia il metodo sperimentale che quello analitico.

A tal riguardo, può essere seguito l'approccio proposto dalla norma UNI 9502 o da altra norma che preveda l'impiego dei suddetti metodi a strutture di calcestruzzo armato.

(2) Per l'applicazione del metodo sperimentale si rimanda alla norma assunta come riferimento senza indicazioni aggiuntive.

(3) Per l'applicazione del metodo analitico e con esplicito riferimento a calcestruzzi rinforzati con fibre metalliche, devono essere svolte le seguenti operazioni:

- analisi delle sollecitazioni di progetto allo SLU con le combinazioni di azioni indicate dalla norma assunta come riferimento;
- calcolo della distribuzione delle temperature sulla sezione critica della struttura mediante un'analisi termica che utilizzi i parametri tipici del calcestruzzo senza rinforzo, come definiti dalla norma di riferimento per il tempo di esposizione richiesto;
- analisi della capacità resistente della sezione critica utilizzando, per il calcestruzzo rinforzato con fibre metalliche, il coefficiente di degrado meccanico a compressione, $K_{Fc}(T)$, e quello a trazione, $K_{Ft}(T)$, entrambi funzioni della temperatura, T , da determinarsi su base sperimentale (in Figura 7-1 è riportato con linea tratteggiata l'andamento qualitativo del grafico di $K_{Ft}(T)$ e con linea continua quello da assumere in via cautelativa in assenza di sperimentazione diretta);
- nel caso di strutture a molte iperstatiche, può risultare necessario non limitarsi al calcolo sezionale ed eseguire invece un'analisi di tipo globale.

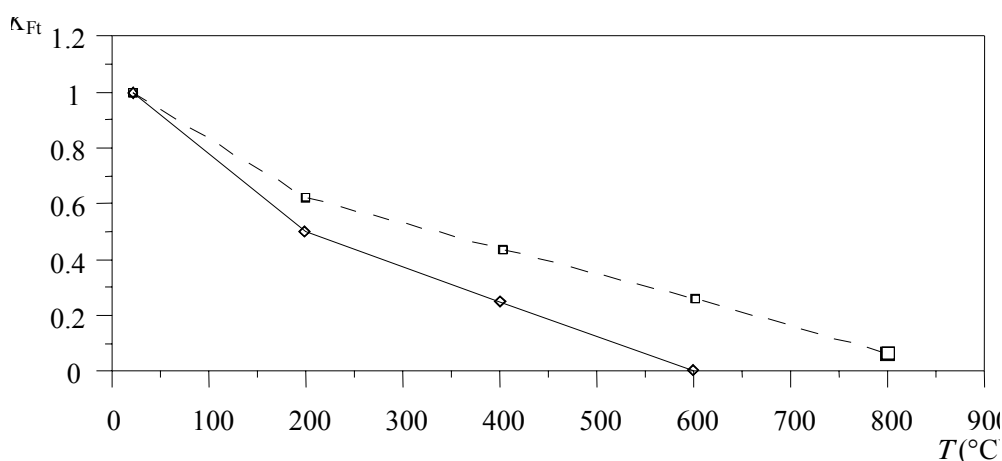


Figura 7-1 – Coefficiente di degrado meccanico K_{Ft} .

(4) Per la valutazione del contributo del calcestruzzo fibrorinforzato alla capacità resistente, facendo riferimento a quanto specificato al § 3.6.1, si introduce un coefficiente parziale di sicurezza, γ_F , pari a 1.2 per applicazioni di tipo A e pari a 1.1 per applicazioni di tipo B, allorché siano previsti controlli per produzioni continuative.

(5) Per i coefficienti di degrado e di sicurezza degli altri materiali si assumono quelli indicati dalla norma assunta come riferimento.

(6) Nell'Appendice E sono riportate indicazioni per la determinazione sperimentale del coefficiente di degrado del calcestruzzo rinforzato con fibre metalliche, $K_{Ft}(T)$; per il comportamento in compressione si può fare, invece, riferimento al caso di calcestruzzo ordinario.

8 COLLAUDO E CONTROLLI DI PRODUZIONE

8.1 COLLAUDO

(1) Per elementi strutturali di calcestruzzo fibrorinforzato nelle cui verifiche di resistenza interviene il contributo delle fibre, devono essere previste opportune prove di carico al fine di validare le ipotesi di progetto. Tali prove devono riguardare tutti i tipi di elementi realizzati e, ove possibile, per ogni tipo, l'elemento più sollecitato.

Le prove devono essere svolte preliminarmente; in alternativa, esse possono essere svolte in sede di collaudo finale. In ogni caso, il carico applicato deve produrre sollecitazioni pari ad almeno 1.2 volte quelle previste nelle condizioni di esercizio.

Il collaudo è da considerarsi positivo se il comportamento sperimentale corrisponde alle ipotesi progettuali.

8.2 CONTROLLI DI PRODUZIONE PER APPLICAZIONI TIPO A

(1) Oltre alle prove ed ai controlli previsti dalle norme di riferimento per le strutture di calcestruzzo armato ordinario, la produzione di elementi strutturali di calcestruzzo fibrorinforzato va sottoposta ad ulteriori controlli specifici che assicurino la conformità dei prodotti ai requisiti di funzionalità, durabilità e resistenza richiesti.

I controlli aggiuntivi di produzione, realizzati sotto la responsabilità del direttore dei lavori, sono riportati in Tabella 8-1.

Tabella 8-1 – Prove durante la produzione.

Oggetto	Proprietà	Metodo	Frequenza	Registrazione
FRC fresco	corretta miscelazione	ispezione visiva [v. UNI EN 206-1 2001]	ogni giorno di getto di miscela omogenea	apposito modulo
FRC fresco	contenuto di fibre	*peso dopo separazione fibre-matrice [v. CEN prEN 14721 2004]	ogni 50 m ³ di getto di miscela omogenea o almeno due controlli al giorno	apposito modulo
FRC indurito	resistenza prima fessurazione	Appendice A	Appendice B	apposito modulo
FRC indurito	resistenze equivalenti	Appendice A	Appendice B	apposito modulo

(*) valida solo per le fibre metalliche (per le fibre di altro tipo occorre mettere a punto modalità specifiche).

(2) Per i manufatti per i quali la distribuzione omogenea delle fibre risulta una caratteristica peculiare, è previsto il controllo del contenuto di fibre sul calcestruzzo indurito.

Per manufatti realizzati con fibre metalliche, il controllo è effettuato mediante microcarotaggi e pesatura dopo la separazione della matrice dalle fibre, secondo la norma CEN prEN 14721.

Per manufatti realizzati con altri tipi di fibre vanno disposte apposite procedure.

8.3 CONTROLLI DI PRODUZIONE PER APPLICAZIONI TIPO B

(1) Per le applicazioni di tipo B (vedere § 3.6.1), in aggiunta a quanto specificato al § 8.2, è richiesto che:

- le prove di carico previste al § 8.1 debbano essere condotte preliminarmente su almeno 2 manufatti fino alla rottura, per verificarne la corrispondenza con le ipotesi progettuali;
- la produzione debba avvenire in un sistema di qualità certificato da un ente terzo notificato.

9 APPENDICE A (SULLA RESISTENZA A TRAZIONE: IDENTIFICAZIONE DEI PARAMETRI COSTITUTIVI)

9.1 MATERIALI DEGRADANTI A TRAZIONE IDENTIFICATI CON PROVE DI FLESSIONE

9.1.1 Modello elastico lineare

Il modello elastico lineare individua due valori di riferimento, f_{Fts} e f_{Ftu} , sulla base del comportamento allo SLE ed allo SLU.

Essi possono essere definiti sulla base di valori equivalenti delle resistenze a flessione mediante le seguenti relazioni:

$$f_{Fts} = 0.45 \cdot f_{eq1}, \quad (9.1)$$

$$f_{Ftu} = k \cdot \left[f_{Fts} - \frac{w_u}{w_{i2}} \cdot (f_{Fts} - 0.5 \cdot f_{eq2} + 0.2 \cdot f_{eq1}) \right] \geq 0, \quad (9.2)$$

dove:

- f_{eq1} e f_{eq2} sono, rispettivamente, le resistenze equivalenti post-fessurazione significative per lo stato limite di esercizio e per lo stato limite ultimo (Figura 9-1a);
- k è un coefficiente da assumersi pari a 0.7 per sezioni interamente tese e pari a 1 negli altri casi;
- w_{i2} è il valore medio delle aperture delle fessure corrispondenti agli estremi dell'intervallo in cui è valutato f_{eq2} (Figura 9-1).

Le equazioni (9.1) e (9.2) sono ancora valide qualora si considerino i valori puntuali f_1 ed f_2 , purché si assuma per w_{i2} il valore superiore dell'intervallo considerato (CTOD₂; Figura 2-3).

Le suddette relazioni sono ricavabili sulla base di semplici considerazioni di equilibrio applicate alla sezione rettangolare inflessa, che corrisponde alla sezione critica del provino sperimentato.

In particolare, l'equazione (9.1) può essere ricavata supponendo che, per valori contenuti di apertura della fessura, tipici della situazione di esercizio ($w \leq 0.6$ mm), valgano le seguenti ipotesi:

- sezioni piane;
- comportamento del materiale elasto-plastico a trazione (con valore massimo pari a f_{Fts} ; Figura 9-2a);
- comportamento del materiale elastico lineare a compressione (Figura 9-2a).

Se si scelgono come incognite la tensione f_{Fts} e la curvatura χ in corrispondenza della sezione critica e si assume lo stesso modulo di elasticità a trazione e a compressione, si può agevolmente risolvere il successivo sistema (9.4) ipotizzando al lembo teso il seguente valore della deformazione:

$$\varepsilon_{F1} = \frac{w_{i1}}{l_{cs}}, \quad (9.3)$$

dove:

- w_{i1} è il valore medio delle aperture di fessura ($CTOD_0$ e $CTOD_1$);
- l_{cs} è l'altezza critica della sezione del provino, ovvero l'altezza h del provino al netto dell'intaglio (Figura 9-3).

Il sistema è il seguente:

$$N = 0,$$

$$M(\varepsilon_{F1}) = \frac{f_{eq1} \cdot b \cdot h^2}{6}. \quad (9.4)$$

Per altezze di sezione critica variabili tra 40 mm e 150 mm, il valore della costante che correla f_{Fts} ad f_{eq1} risulta prossimo al numero 0.45 proposto.

La (9.2) è ottenuta ipotizzando un legame lineare tra i punti di ascissa w_{i1} e w_{i2} , esteso fino al punto di ascissa w_u (Figura 9-2b). Il valore di tensione relativo all'apertura w_{i2} si ricava sulla base dell'equilibrio alla rotazione (equazione (9.5)), assumendo che la risultante delle compressioni, C , sia applicata alla fibra di estradosso (Figura 9-2b) e che il comportamento a trazione sia del tipo rigido-lineare:

$$M(\varepsilon_{F2}) = \frac{f_{eq2} \cdot b \cdot h^2}{6}. \quad (9.5)$$

Il valore di $\varepsilon_{F2} = w_{i2}/l_{cs}$ fa riferimento al valore medio dell'intervallo di apertura di fessura assunto per la definizione del valore f_{eq2} .

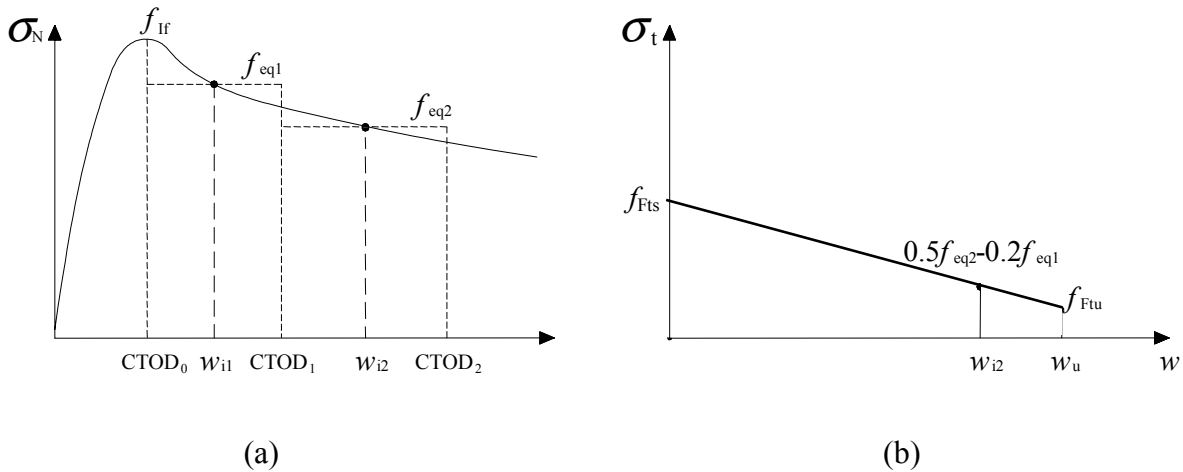


Figura 9-1 –Valori delle resistenze a trazione determinati sulla base dei risultati della prova di flessione per materiali degradanti.

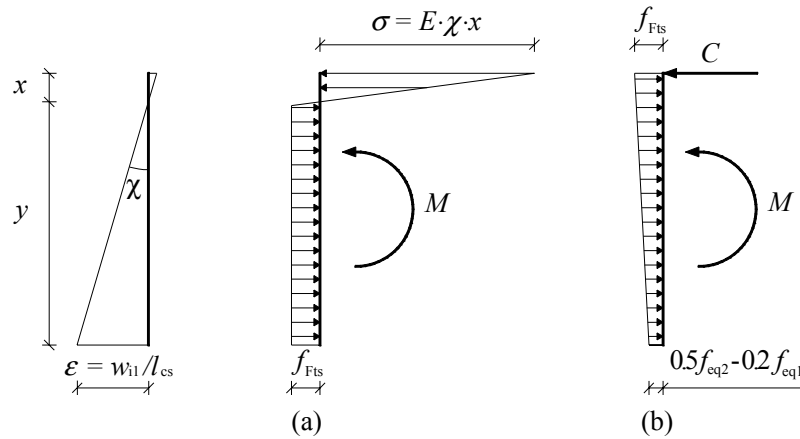


Figura 9-2 – Diagrammi tensionali per la determinazione della resistenza a trazione.

9.1.2 Modello rigido-plastico

Il modello rigido-plastico individua un unico valore di riferimento, f_{Ftu} , sulla base del comportamento ultimo. Tale valore si calcola come:

$$f_{Ftu} = \frac{f_{eq2}}{3}. \quad (9.6)$$

L'equazione (9.6) si ricava, sempre con riferimento allo SLU, imponendo l'equilibrio alla rotazione come nel caso precedente, ma tenendo conto di un diagramma di sforzi di trazione costante:

$$M_u = \frac{f_{eq2} \cdot b \cdot h^2}{6} = \frac{f_{Ftu} \cdot b \cdot h^2}{2}. \quad (9.7)$$

9.1.3 Provino intagliato (secondo la norma UNI 11039)

Nel caso di prova a flessione su quattro punti, secondo lo standard UNI 11039, i valori caratteristici delle resistenze equivalenti, f_{eq1k} e f_{eq2k} , sono valutati negli intervalli $0 \leq w \leq 0.6$ mm e $0.6 \leq w \leq 3.0$ mm. Pertanto, adottando la simbologia della norma UNI 11039, si assume:

$$f_{eq1k} = f_{eq(0-0.6)k}, \quad (9.8)$$

$$f_{eq2k} = f_{eq(0.6-3.0)k}. \quad (9.9)$$

Tali resistenze equivalenti corrispondono, rispettivamente, ad aperture di fessura w_{i1} pari a 0.3 mm e w_{i2} pari a 1.8 mm, corrispondenti ai valori medi negli intervalli selezionati.

Nel caso in esame, per tener conto della presenza dell'intaglio (Figura 9-3), il valore della resistenza a trazione, f_{Ft} (Figura 2-5), può essere assunto pari a 0.9 volte il valore di prima fessurazione desunto dalla prova sperimentale.

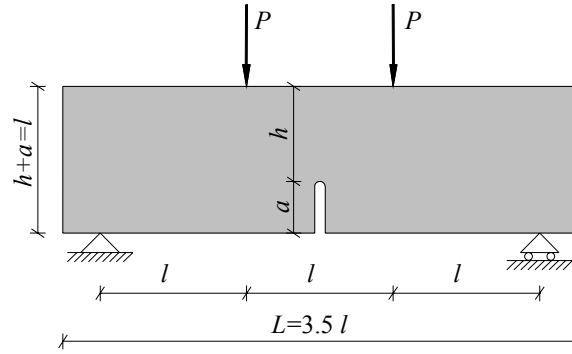


Figura 9-3 – Prova di flessione a quattro punti su provino intagliato.

9.1.4 Provino strutturale non intagliato (secondo la norma UNI U73041440)

Per strutture inflesse con altezza di sezione inferiore a 150 mm, oppure per comportamenti a flessione di tipo incrudente, risulta vantaggioso operare il processo di identificazione delle proprietà del materiale tenendo conto della direzione del getto e del ridotto spessore della struttura senza intagliare i campioni sperimentali. Nel caso specificato, i valori caratteristici delle resistenze equivalenti, f_{eq1k} e f_{eq2k} , sono valutati negli intervalli $3 \cdot w_I \leq w \leq 5 \cdot w_I$ e $0.8 \cdot w_u \leq w \leq 1.2 \cdot w_u$, dove w_I rappresenta l'apertura di fessura corrispondente alla fessurazione, calcolato in corrispondenza del carico massimo registrato durante la prova nell'intervallo $0 \leq w \leq 0.1$ mm. Per l'apertura ultima di fessura, w_u , si assume un valore pari a 3 mm. Adottando la simbologia della norma UNI U73041440, risulta:

$$f_{eq1k} = f_{1tFk} \quad (9.10)$$

$$f_{eq2k} = f_{Ftk} \quad (9.11)$$

Tali resistenze equivalenti corrispondono, rispettivamente, ad aperture di fessure pari a $w_{i1} = 4 \cdot w_I$ e $w_{i2} = w_u$.

Il valore della resistenza a trazione, f_{Ft} (Figura 2-5), può essere calcolato sulla base di quello di prima fessurazione, $f_{ct,exp}$, desunto dalla prova sperimentale:

$$f_{Ft} = \frac{f_{ct,exp}}{\beta(h)} \quad (9.12)$$

$$\beta(h) = \frac{25 + 2 \cdot h^{0.7}}{2 \cdot h^{0.7}} \quad [\text{mm}] \quad (9.13)$$

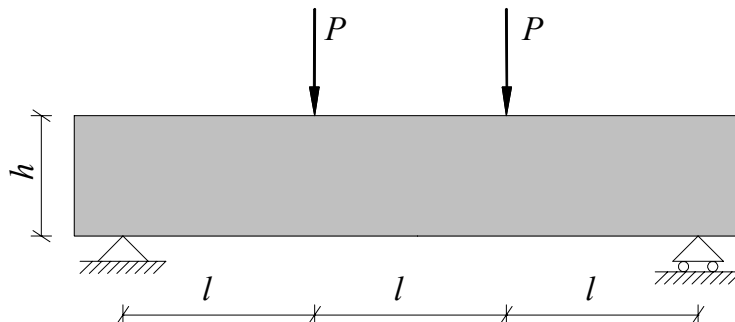


Figura 9-4 – Prova di flessione a quattro punti su provino “strutturale”.

9.2 MATERIALI IDENTIFICATI CON PROVE DI TRAZIONE

I parametri costitutivi del modello elastico-lineare e del modello rigido-plastico (Figura 2-4), possono essere identificati con prove di trazione uniassiale.

In tal caso le resistenze nominali sono definite direttamente dal rapporto tra carico applicato e area della sezione trasversale del provino.

Il due valori di riferimento, f_{Fts} ed f_{Ftu} , per il modello elastico lineare possono essere definiti sulla base dei valori equivalenti per il tramite delle seguenti relazioni:

$$f_{Fts} = f_{eq1} \quad (9.14)$$

$$f_{Ftu} = f_{Fts} - \frac{w_u}{w_{i2}} \cdot (f_{eq1} - f_{eq2}) \quad (9.15)$$

9.2.1 Provino intagliato (secondo la norma UNI U73041440)

I materiali con comportamento degradante possono essere caratterizzati mediante l'esecuzione di una prova a trazione uniassiale su provino intagliato, secondo la norma UNI U73041440. I valori caratteristici delle resistenze equivalenti, f_{eq1k} e f_{eq2k} , sono valutati negli intervalli $3 \cdot w_1 \leq w \leq 5 \cdot w_1$ e $0.8 \cdot w_u \leq w \leq 1.2 \cdot w_u$. Il valore w_1 rappresenta l'apertura di fessura corrispondente alla fessurazione, calcolata in corrispondenza del carico massimo registrato durante la prova nell'intervallo $0 \leq w \leq 0.05$ mm. Per l'apertura ultima di fessura, w_u , si assume un valore pari a 1.5 mm.

Pertanto, adottando la simbologia della norma UNI U73041440, risulta:

$$f_{eq1k} = f_{1tk} \quad (9.16)$$

$$f_{eq2k} = f_{Ftk} \quad (9.17)$$

Tali resistenze equivalenti corrispondono rispettivamente ad aperture di fessure pari a $w_{i1} = 4 \cdot w_1$ e $w_{i2} = w_u$, ovvero ai valori medi negli intervalli selezionati.

Il valore della resistenza a trazione, f_{Ft} (Figura 2-5), può essere calcolato sulla base di quello di prima fessurazione desunto dalla prova sperimentale e corrispondente al valore di apertura di fessura, w_1 .

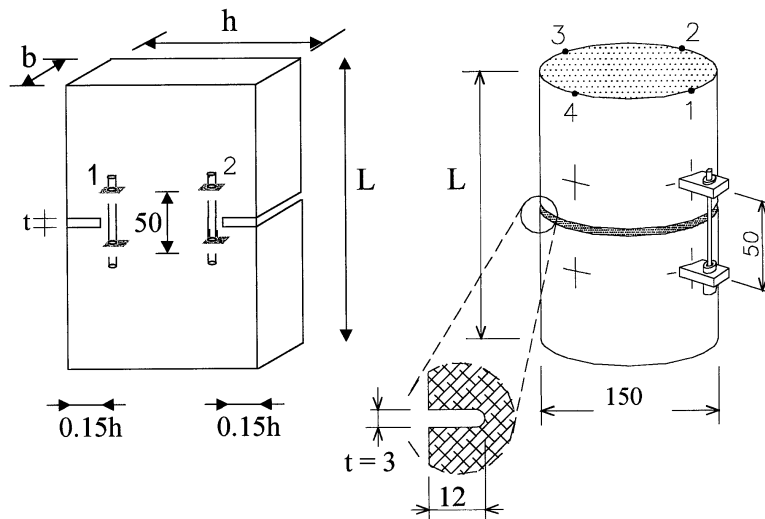


Figura 9-5 – Prova di trazione diretta su provino intagliato (misure in mm).

9.2.2 Provino non intagliato

Per comportamento incrudente, la caratterizzazione del materiale può essere sviluppata con prova a trazione uniassiale su provino non intagliato con le modalità descritte nell'Appendice C.

In tal caso il parametro w caratterizza lo spostamento relativo su una base di misura prefissata (Appendice C).

I valori caratteristici delle resistenze equivalenti, f_{eq1k} e f_{eq2k} , sono valutati negli intervalli $3 \cdot w_l \leq w \leq 5 \cdot w_l$ e $0.8 \cdot w_u \leq w \leq 1.2 \cdot w_u$. Il valore w_l rappresenta lo spostamento relativo corrispondente alla fessurazione, calcolato in corrispondenza del carico massimo registrato durante la prova nell'intervallo $0 \leq w \leq 0.05$ mm. Il valore ultimo di w_u corrisponde ad una deformazione media dell'1% (Capitolo 2, § 2.5.3.2) e, pertanto, è pari a 0.01 volte la lunghezza della base di misura.

Le resistenze equivalenti, f_{eq1k} e f_{eq2k} , corrispondono, rispettivamente, a spostamenti relativi pari a: $w_{i1} = 4 \cdot w_l$ e $w_{i2} = w_u$.

10 APPENDICE B (SUL CONTROLLO E SUI CRITERI DI CONFORMITÀ)

Il controllo di conformità viene sviluppato con modalità differenti per materiali degradanti e incrudenti.

Per i materiali degradanti possono essere eseguite sia prove di flessione su provini intagliati o non intagliati, sia prove di trazione su provino intagliato. Il controllo di conformità su materiali incrudenti deve essere effettuato con prove di trazione uniassiale su provino non intagliato.

Per i materiali incrudenti, nel caso di produzioni continuative, è possibile effettuare il controllo di conformità mediante prove a flessione così come specificato in Appendice C, dopo aver stabilito la correlazione tra tali prove e quelle a trazione diretta su provino non intagliato. Queste ultime devono essere effettuate ad intervalli non superiori a sei mesi e comunque in occasione di ogni modifica significativa del processo produttivo.

I criteri di campionamento di calcestruzzi fibrorinforzati utilizzati per scopi strutturali sono quelli indicati dalla Normativa vigente per la resistenza a compressione del calcestruzzo ordinario.

Allo stesso modo, la resistenza a compressione viene determinata con i medesimi criteri indicati dalla Normativa vigente per il calcestruzzo non rinforzato.

10.1 PROVE DI FLESSIONE SU MATERIALE CLASSIFICATO DEGRADANTE

Il controllo di conformità sul materiale deve essere eseguito in accordo alla norma UNI 11039 per provino intagliato, o in accordo alla norma UNI U73041440 per provino strutturale non intagliato o ad altre normative internazionali.

La conformità con i valori caratteristici della resistenza di prima fessurazione, f_{Ft} , e delle resistenze equivalenti per flessione del fibrorinforzato, f_{eq1} e f_{eq2} , deve essere verificata distinguendo tra il controllo di tipo A e quello di tipo B (Tabella 10-1).

Le relazioni tra i parametri f_{Ft} , f_{eq1} , f_{eq2} e quelli specifici introdotti nelle varie modalità di prova sono indicate in Appendice A.

Tabella 10-1 – Valori minimi da garantire nel controllo di conformità.

Produzione	Numero n di risultati di prova	Criterio 1	Criterio 2
		Media di n risultati $\bar{x}_j$ [MPa]	Ogni singolo risultato di prova x_j [MPa]
controllo tipo A	≥ 3	$\geq x_k + \Delta$	$\geq x_k - \Delta$
controllo tipo B	6	$\geq x_k + 1.87 \cdot \sigma$	$\geq x_k - \Delta$
	7	$\geq x_k + 1.77 \cdot \sigma$	
	8	$\geq x_k + 1.72 \cdot \sigma$	
	9	$\geq x_k + 1.67 \cdot \sigma$	
	10	$\geq x_k + 1.62 \cdot \sigma$	
	11	$\geq x_k + 1.58 \cdot \sigma$	
	12	$\geq x_k + 1.55 \cdot \sigma$	
	13	$\geq x_k + 1.52 \cdot \sigma$	
	14	$\geq x_k + 1.50 \cdot \sigma$	
	15	$\geq x_k + 1.48 \cdot \sigma$	

Nella Tabella 10-1:

- σ denota lo scarto quadratico medio;
- Δ vale 0.5 con riferimento al parametro f_{Ft} e 0.2 con riferimento ai parametri f_{eq1}, f_{eq2} .

Nell'eventualità che nel calcolo si assumano legami costitutivi multilineari, o si faccia riferimento ad altre normative di caratterizzazione, il controllo di conformità deve essere eseguito sui parametri di resistenza equivalente per flessione assunti come dati di riferimento, con procedure analoghe a quella sopra indicata.

11 APPENDICE C (SULLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE MECCANICA PER MATERIALI INCRUDENTI)

11.1 PROVA DI TRAZIONE

I parametri strutturali caratterizzanti il comportamento a trazione possono essere determinati mediante una prova di trazione diretta su provino non intagliato, in accordo con quanto descritto nel seguito o nelle specifiche normative internazionali.

La prova è finalizzata alla determinazione della curva tensione-deformazione ed in particolare della resistenza di prima ed ultima fessurazione e delle corrispondenti deformazioni, come specificato nel § 2.5.2.3.

11.1.1 Preparazione del provino

Il provino ha dimensioni e geometria indicate in Figura 11-1 (lunghezza totale: 330 mm). Lo spessore, t_p , del provino deve essere maggiore di 5 volte il massimo diametro dell'aggregato ed in ogni caso non inferiore a 13 mm. La larghezza, b_p , deve essere maggiore di 5 volte il massimo diametro dell'aggregato ed in ogni caso non inferiore a 30 mm.

Esso può essere ottenuto per taglio dell'elemento strutturale oppure gettato contemporaneamente in forma separata con le stesse modalità e la stessa giacitura dell'elemento strutturale.

Nel caso sia gettato in forma separata, il provino deve essere maturato con le medesime modalità dell'elemento strutturale.

11.1.2 Apparecchiatura di prova

La macchina di prova deve essere conforme alla norma CEN-EN-12390-4 per quanto riguarda i seguenti punti:

- misura della forza;
- accuratezza della indicazione della forza;
- frequenza della taratura;
- sicurezza.

La macchina di prova deve essere dotata di idoneo dispositivo che permetta di effettuare le prove in controllo di spostamento.

Il provino viene afferrato mediante opportuni morsetti in corrispondenza delle due estremità ingrossate, adottando eventuali accorgimenti per diffondere la pressione locale. I morsetti devono essere liberi di ruotare in tutte le direzioni.

La misura del carico deve essere effettuata mediante un sistema caratterizzato da un errore relativo contenuto entro il $\pm 1\%$, un errore di ripetitività inferiore all'1%, un errore sul fondo scala inferiore a $\pm 0.2\%$ ed una risoluzione della macchina inferiore allo 0.5%.

L'apparato misura lo spostamento relativo tra due punti distanti 80 mm in almeno 2 posizioni contrapposte, come illustrato in Figura 11-2.

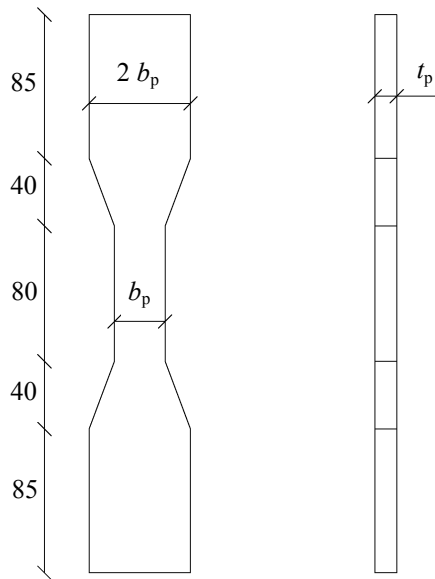


Figura 11-1 – Geometria del provino (misure in mm).

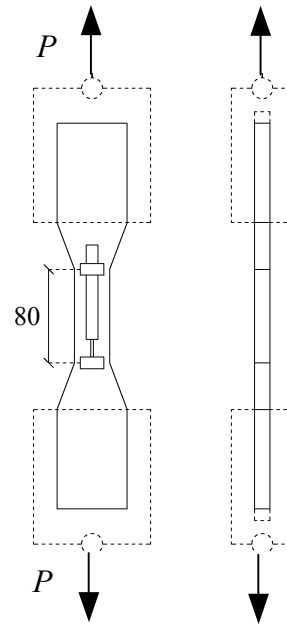


Figura 11-2 – Strumentazione per la prova di trazione (misure in mm).

11.1.3 Procedura di carico

La prova di trazione deve essere effettuata in controllo di spostamento dell'attuatore o eventualmente dei punti di riferimento per la misura dello spostamento relativo. Il parametro di controllo deve essere aumentato con una velocità costante pari a 0.05 ± 0.01 mm/min. Il carico ed i valori di spostamento devono essere registrati con continuità su supporto magnetico. La prova può essere terminata in corrispondenza di un valore dello spostamento relativo medio non minore di 0.8 mm.

Si deve determinare la curva tensione nominale-deformazione dividendo il carico per l'area della sezione nominale e lo spostamento relativo per la lunghezza della base di misura, pari a 80 mm.

11.2 PROVA DI FLESSIONE

La prova di flessione può essere utilizzata solo per il controllo di conformità in alternativa alla prova di trazione, previa esecuzione di quest'ultima e relativa determinazione dei parametri di correlazione.

I parametri strutturali di resistenza a flessione possono essere determinati mediante una prova di flessione su quattro punti su provino non intagliato o su provino intagliato in analogia a quanto indicato per i materiali degradanti.

12 APPENDICE D (SULLA RESISTENZA DEI MATERIALI: CALCOLO DEI VALORI CARATTERISTICI PER LA PROGETTAZIONE DELLE STRUTTURE)

In strutture iperstatiche, ove si manifestano fenomeni di collasso che coinvolgono ampie regioni fessurate e significative redistribuzioni, il valore caratteristico ottenuto a partire da campioni di ridotte dimensioni non è rappresentativo ai fini della valutazione della resistenza di strutture con dimensioni significativamente più elevate.

A tal riguardo, gli effetti dell'iperstaticità strutturale sulla disuniformità topologica del fibrorinforzato possono essere valutati sperimentalmente mediante prove di qualificazione eseguite su assetti iperstatici opportunamente correlati all'effettivo assetto strutturale di destinazione.

In assenza di apposite sperimentazioni, si può computare tale contributo positivo facendo uso della formula (equazione (3.7)):

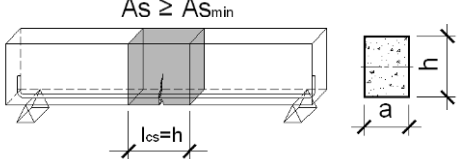
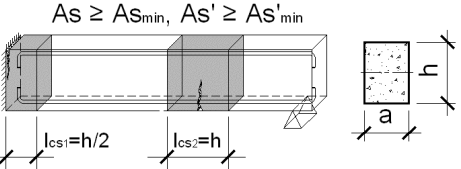
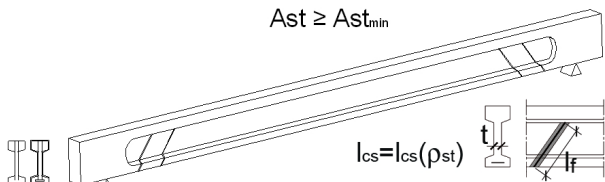
$$f_{Ftk} = f_{Ftm} - \alpha \cdot k \cdot s, \quad (12.1)$$

essendo:

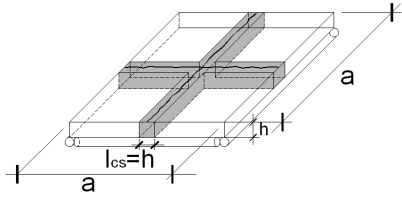
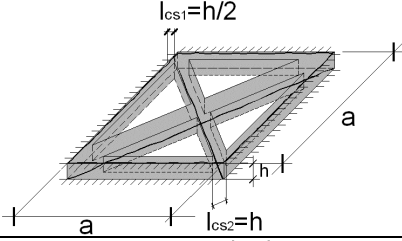
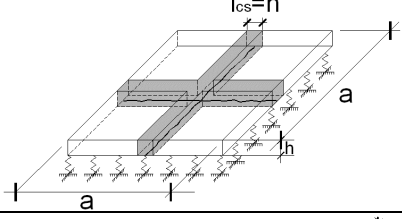
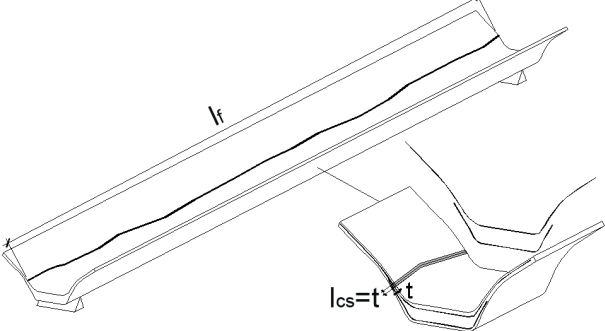
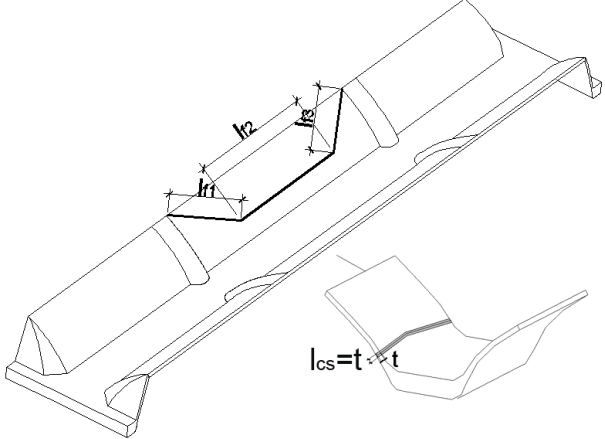
$$0.5 \leq \alpha = \left[1 - 0.1 \cdot \left(\frac{v}{2 \cdot v_0} - 1 \right) \cdot \left(\frac{\alpha_u}{\alpha_1} - 1 \right) \right] \leq 1.0. \quad (12.2)$$

Nella (12.1) si assume per k il valore 1.48. Inoltre, in assenza di specifiche analisi teorico-sperimentali, si assumono per la quantità v , al numeratore del rapporto v/v_0 (rapporto tra il volume dell'elemento ed il volume di riferimento), e per il rapporto α_u/α_1 (rapporto tra il carico massimo e quello al limite elastico) i valori indicati nella Tabella 12-1.

Tabella 12-1 – Valori di v e di α_u/α_1 per differenti applicazioni strutturali.

Applicazione strutturale	Esempi di elementi e di fessurazione	$\frac{\alpha_u}{\alpha_1}$	v
flessione in trave isostatica con armatura longitudinale minima a flessione		1.2	$l_{cs} \cdot a \cdot h$
flessione in trave iperstatica con armatura longitudinale		1.4 *	$(l_{cs1} + l_{cs2}) \cdot a \cdot h$
taglio in trave con armatura trasversale convenzionale, superiore al minimo previsto dall'EC2		1.2	$\rho_{st} = \text{rapporto geometrico d'armatura trasversale}$ $l_{cs} = l_{cs}(\rho_{st})$ $l_{cs} \cdot t \cdot l_f^{**}$

%

flessione in piastra semplicemente appoggiata		1.3	$2 \cdot l_{cs} \cdot a \cdot h$
flessione in piastra incastrata		2	$(2 \cdot l_{cs1} + \sqrt{2} \cdot l_{cs2}) \cdot 2 \cdot a \cdot h$
flessione in piastra su suolo elastico		3	$2 \cdot l_{cs} \cdot a \cdot h$
flessione trasversale in elemento in parete sottile e profilo aperto, a geometria filante, con armatura trasversale minima		1.2	$l_{cs} \cdot t \cdot l_f^{**}$
flessione trasversale in elemento in parete sottile a profilo aperto, con irrigidimenti trasversali, con passo non superiore a 5 volte la larghezza dell'elemento		1.2	$l_f^{**} = l_{f1} + l_{f2} + l_{f3}$ $l_{cs} \cdot t \cdot l_f^{**}$

* per travi iperstatiche sono ammessi valori superiori solo se risultanti da specifiche prove sperimentali.

** l_f lunghezza della fessura.

Il volume di riferimento, v_0 , è definito come il volume della zona coinvolta dal processo fessurativo nel provino sperimentato. Per il provino UNI 11039 di dimensioni $150 \times 150 \times 600 \text{ mm}^3$, risulta $v_0 = 3.375 \text{ dm}^3$ (Figura 12-1).

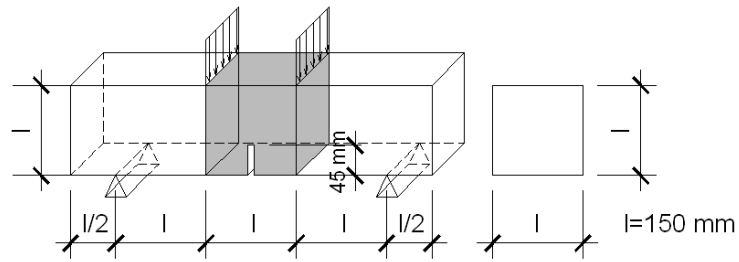


Figura 12-1– Prova di flessione a quattro punti su provino UNI 11039.

13 APPENDICE E (SULLA DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DEI COEFFICIENTI DI DEGRADO)

La determinazione sperimentale dei coefficienti di degrado del calcestruzzo rinforzato con fibre metalliche, $K_{Fc}(T)$ e $K_{Ft}(T)$, può essere effettuata con prove di compressione e di trazione diretta su provini preventivamente sottoposti a ciclo termico, trascurando l'influenza della temperatura istantanea sul comportamento meccanico del materiale.

I cicli termici devono essere effettuati in forno raggiungendo le temperature massime di 200, 400, 600 e 800 °C. Il materiale deve essere scaldato con una velocità pari a 30 °C/h fino al raggiungimento della temperatura massima di riferimento del ciclo. La temperatura deve essere mantenuta costante e pari alla massima temperatura del ciclo per almeno 2h. Successivamente si procede al raffreddamento del campione ad una velocità di 12 °C/h fino al raggiungimento della temperatura ambiente.

Prove di compressione

Il coefficiente di degrado della resistenza a compressione, $K_{Fc}(T)$, viene determinato dopo un ciclo termico computando il rapporto tra la resistenza finale a compressione, valutata con gli stessi criteri indicati dalla Normativa vigente per il calcestruzzo non rinforzato, e la corrispondente resistenza riferita al materiale non danneggiato termicamente.

Prove di trazione diretta

Il coefficiente di degrado della resistenza a trazione diretta, $K_{Ft}(T)$, viene determinato come rapporto tra le resistenze a trazione e le corrispondenti resistenze riferite al materiale non danneggiato termicamente, per i valori di riferimento f_{Fts} ed f_{Ftu} , caratterizzanti il modello elastico lineare, come illustrato nell'Appendice A delle presenti Istruzioni.

Materiale degradante

Nel caso in cui il materiale a temperatura ambiente risulti degradante, le prove di trazione diretta devono essere eseguite su provini sottoposti a ciclo termico e successivamente intagliati. La prova e la preparazione dei provini dopo il ciclo termico devono essere condotte secondo le modalità descritte dalla norma UNI U73041440 relativa a provini di calcestruzzo fibrorinforzato non danneggiati termicamente.

Materiale incrudente

Nel caso in cui il materiale a temperatura ambiente risulti incrudente, le prove di trazione diretta devono essere eseguite su provini non intagliati sottoposti a ciclo termico. La prova e la preparazione dei provini devono essere condotte secondo le modalità descritte nell'Appendice C delle presenti Istruzioni riferite a provini di materiale incrudente non danneggiati termicamente.

Al fine di valutare l'influenza della temperatura istantanea sulle proprietà meccaniche identificate dopo un ciclo termico sul materiale, è possibile effettuare una serie di prove comparative di flessione. Per ognuna delle temperature di riferimento (200, 400, 600 ed 800 °C) si devono eseguire prove a temperatura ambiente su campioni sottoposti preventivamente a ciclo termico e prove ad estrazione rapida su ulteriori campioni alle medesime temperature.

In particolare, con riferimento alla prova ad estrazione rapida, è richiesto che il generico provino prismatico, non intagliato in accordo con la norma UNI U73041440, sia riscaldato con velocità pari a 30 °C/h fino al raggiungimento della temperatura prefissata e successivamente conservato a tale temperatura per almeno 2 h. Il provino così condizionato può essere successivamente sottoposto a

prova di flessione, adottando nel corso di quest'ultima opportune precauzioni al fine di limitare il rapido raffreddamento del provino stesso.

La procedura di prova richiede altresì che il provino testato non sia strumentato e che il carico sia applicato imponendo un gradiente di spostamento pari a 1mm/min per valori della tensione di trazione inferiori a quello di picco, ovvero pari a 2 mm/min negli altri casi.

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

ANGOTTI Prof. Franco	- Università di Firenze
ASCIONE Prof. Luigi	- Università di Salerno
BERARDI Ing. Valentino Paolo	- Università di Salerno
DI PRISCO Prof. Marco	- Politecnico di Milano
FAILLA Ing. Claudio	- Magnetti Building S.p.a. - Carvico (BG)
GRIMALDI Prof. Antonio	- Università "Tor Vergata" - Roma
MEDA Prof. Alberto	- Università di Bergamo
RINALDI Ing. Zila	- Università "Tor Vergata" - Roma
PLIZZARI Prof. Giovanni	- Università di Brescia
POZZATI Prof. Piero	- Università di Bologna
SAVOIA Prof. Marco	- Università di Bologna

Coordinatore:

GRIMALDI Prof. Antonio.

Coordinatore generale della collana di documenti sull'impiego strutturale dei materiali compositi:

ASCIONE Prof. Luigi.

Segreteria:

FEO Prof. Luciano, ROSATI Prof. Luciano.

Il presente Documento Tecnico, a seguito di interazioni con il gruppo di studio, è stato discusso il 29/11/2005 ed il 26/01/2006 ed approvato in data 02/03/2006 dalla “Commissione incaricata di formulare pareri in materia di normativa tecnica relativa alle costruzioni” così composta:

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