

Linee Guida
CONPAVIPER

per la prescrizione
di calcestruzzi fibrorinforzati
per la realizzazione di pavimentazioni

Revisione n. 01.12 del 10 marzo 2010

1. Premessa

*Obiettivo primario delle Linee Guida per le pavimentazioni in calcestruzzo fibrorinforzato (FRC) di CONPAVIPER è quello di introdurre il concetto di **prestazione** nelle prescrizioni per il calcestruzzo fibrorinforzato da utilizzare nella realizzazione di un pavimento industriale.*

Il calcestruzzo fibrorinforzato (FRC) è un materiale composito basato su una matrice di calcestruzzo alla quale sono aggiunte delle fibre. L'impiego di tale composito è particolarmente adatto nelle strutture iperstatiche, tra le quali le pavimentazioni industriali su massiciata sono un esempio significativo, in quanto la resistenza residua a trazione in fase fessurata, offerta dal fibrorinforzo, aumenta la capacità portante complessiva della struttura.

Le fibre risultano particolarmente efficaci nelle pavimentazioni di calcestruzzo per:

- 1. ridurre la fessurazione da ritiro;*
- 2. sostituire, parzialmente o totalmente, l'armatura convenzionale (solitamente la rete elettrosaldata).*

Questi due obiettivi non devono essere necessariamente alternativi in quanto una o più tipologie di fibre potrebbero essere utilizzate contemporaneamente per ridurre la fessurazione da ritiro e per sostituire l'armatura convenzionale.

**Linee Guida
CONPAVIPER**

per la prescrizione di calcestruzzi fibrorinforzati per la realizzazione di pavimentazioni

2. Sommario

1. <u>PREMESSA</u>	2
2. <u>SOMMARIO</u>	3
3. <u>NORMATIVE DI RIFERIMENTO</u>	4
4. <u>IL CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO</u>	5
5. <u>APPROCCI PROGETTUALI PER LE PAVIMENTAZIONI DI CALCESTRUZZO</u>	6
6. <u>PRESTAZIONI MINIME PER L'UTILIZZO DEI CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI NELLA REALIZZAZIONE DEI PAVIMENTI</u>	9
7. <u>PRESCRIZIONI PER LA MATRICE DI CALCESTRUZZO</u>	10
8. <u>CLASSI PRESTAZIONALI PER LA TENACITÀ DEL CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO</u>	10
9. <u>PROGETTAZIONE DI PAVIMENTI IN CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO</u>	11
10. <u>CONTROLLO DELLA FESSURAZIONE DA RITIRO</u>	12
11. <u>DURABILITÀ DELLE PAVIMENTAZIONI IN FRC</u>	13
12. <u>POMPABILITÀ DEL FRC</u>	14
13. <u>CONTROLLO DI QUALITÀ DEI PAVIMENTI IN FRC</u>	14
APPENDICE	17
A1. <u>METODI DI CALCOLO NON LINEARE</u>	17
A2. <u>CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL CALCESTRUZZO FRC</u>	19
A3. <u>VERIFICA DEI LIMITI SULLE RESISTENZE RESIDUE DEL FRC</u>	22

3. Normative di riferimento

Legge 5.11.1971 n. 1086 (1971), “Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato normale, precompresso ed a struttura metallica”.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2008), Decreto Ministeriale 14.1.2008, “Norme tecniche per le costruzioni”.

CNR DT 204 (2006), “Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato”, Consiglio Nazionale delle Ricerche.

Concrete Society (2003), “Concrete industrial round floors – A guide to design and construction”, Technical Report (TR) No. 34, Third Edition, 104 pp.

Eurocodice 2 (2005), “Progettazione delle strutture di calcestruzzo. Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici”, UNI EN 1992-1-2, 210 pp.

Hillerborg, H., Modeèer, M., Petersson, P.E. (1976), “Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements,” Cement and Concrete Research, 6, pp. 773-782.

Johansen, K.W. (1962), “Yield line theory”, London, William Clowes and Sons Ltd.

UNI EN 206-1 (2006), “Calcestruzzo: specificazione, prestazione, produzione e conformità”.

EN 14845-1 (2007), “Test methods for fibres in concrete - Part 1: Reference concretes”.

EN 14845-2 (2007), “Test methods for fibres for concrete - Part 2 — Effect on concrete”.

UNI 11039 (2003), “Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio. Parte I: Definizioni, classifica-zione e designazione. Parte II: Metodo di prova per la determinazione della resistenza di prima fessurazione e degli indici di duttilità”, 2003.

UNI 11146 (2005), “Pavimenti di calcestruzzo ad uso industriale”.

UNI 11188 (2006), “Progettazione, esecuzione e controllo degli elementi strutturali in calcestruzzo rinforzato con fibre d’acciaio”.

UNI 11307 (2008), “Prova sul calcestruzzo indurito - Determinazione del ritiro”.

UNI EN 14651 (2007), “Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (Limit Of Proportionality (LOP), residual)”.

UNI EN 14721 (2007), “Metodo di prova per calcestruzzo con fibre metalliche - Misurazione del contenuto di fibre nel calcestruzzo fresco e nel calcestruzzo indurito”.

UNI EN 14889-1, “Fibres for concrete – Part 1: Steel fibres – Definitions, specifications and conformity”, August 2006.

UNI EN 14889-2, “Fibres for concrete – Part 2: Polymer fibres – Definitions, specifications and conformity”, August 2006.

4. Il calcestruzzo fibrorinforzato

L'utilizzo di fibre all'interno della matrice cementizia ha come fine la formazione di un materiale composito nel quale il conglomerato è unito ad un agente rinforzante formato da materiale fibroso di varia natura.

Il calcestruzzo fibrorinforzato è quindi un composito a matrice cementizia, costituito da cemento, acqua, aggregati, fibre ed eventuali additivi; i diversi componenti devono essere opportunamente combinati per ottenere le proprietà allo stato fresco e le caratteristiche meccaniche allo stato indurito richieste dal Prescrittore. Di conseguenza, per ottenere un calcestruzzo fibrorinforzato a prestazioni garantite, non basta aggiungere delle fibre ad una matrice di calcestruzzo, ma la miscela del composito deve essere opportunamente progettata.

Le fibre risultano caratterizzate, oltre che dal tipo di materiale, da parametri geometrici quali la lunghezza, il diametro equivalente, il rapporto d'aspetto e la forma (fibre lisce, uncinato, ecc.). I principali parametri geometrici della fibra sono riportati nel seguito:

- la lunghezza della fibra (l_f) è la distanza tra le estremità della fibra e deve essere misurata in accordo con le norme di riferimento specifiche;
- la lunghezza in sviluppo della fibra (l_d) è la lunghezza della linea d'asse della fibra;
- il diametro equivalente (d_f) è il diametro di un cerchio con area uguale all'area media della sezione trasversale della fibra;
- il rapporto d'aspetto è definito come quoziente tra la lunghezza e il diametro equivalente della fibra.

I principali vantaggi derivanti dall'utilizzo di fibre come elemento di rinforzo di una pavimentazione sono sia costruttivi che strutturali; basti pensare alla eliminazione (o alla notevole riduzione) dei tempi di posa in opera dell'armatura (con conseguente riduzione dei costi della manodopera) e dei tempi di controllo della D.L., al miglioramento del comportamento fessurativo (con il conseguente aumento della durabilità dell'opera).

Le tipologie di carico normalmente applicate alle pavimentazioni industriali comportano stati di sforzo particolarmente complessi. I carichi mobili, ad esempio, esercitano azioni cicliche variabili nei diversi punti della pavimentazione che risulta così sottoposta ad azioni flettenti con trazioni sia nella parte superiore sia in quella inferiore. La presenza di un momento flettente che tende le fibre superiori richiede un'armatura all'estradosso della piastra. L'utilizzo a tal fine di una rete elettrosaldata richiede particolari attenzioni in quanto, durante le operazioni di getto, la rete superiore potrebbe essere schiacciata sul

fondo della pavimentazione, sia pur in presenza di distanziatori. In questo contesto le fibre, distribuendosi uniformemente nel volume della piastra, rappresentano un'armatura ideale, tanto da non richiedere particolare mano d'opera per la posa e da non creare problemi durante la fase di getto.

5. Approcci progettuali per le pavimentazioni di calcestruzzo

Le pavimentazioni sono strutture (piastre su appoggio continuo) sottoposte a sollecitazioni di tipo flessionale e di taglio che nascono nel trasferire i carichi superficiali al sottofondo. Gli strati di supporto reagiscono a tali sollecitazioni subendo dei cedimenti i quali dovranno essere modesti, in modo da non compromettere la funzionalità della pavimentazione.

La progettazione di pavimentazioni è prevalentemente governata dagli Stati Limite di Esercizio (controllo della fessurazione e delle deformazioni) anche se gli Stati Limite Ultimi dovranno comunque essere adeguatamente presi in considerazione.

Un pavimento può essere progettato adottando le due ipotesi di comportamento strutturale elencate nel seguito:

1. **Struttura interamente reagente**, non fessurata, priva di armatura, la cui resistenza è affidata alla resistenza a trazione del solo calcestruzzo; in questo caso la rete di armatura convenzionale o le fibre possono essere utilizzate solo per scopi che nel seguito vengono convenzionalmente definiti come “non strutturali” quali, per esempio, la necessità di contrastare i fenomeni di ritiro. La progettazione del pavimento avviene seguendo le classiche regole del calcolo elastico per il quale, ove possibile, si possono utilizzare le formule di Westergaard (1926).

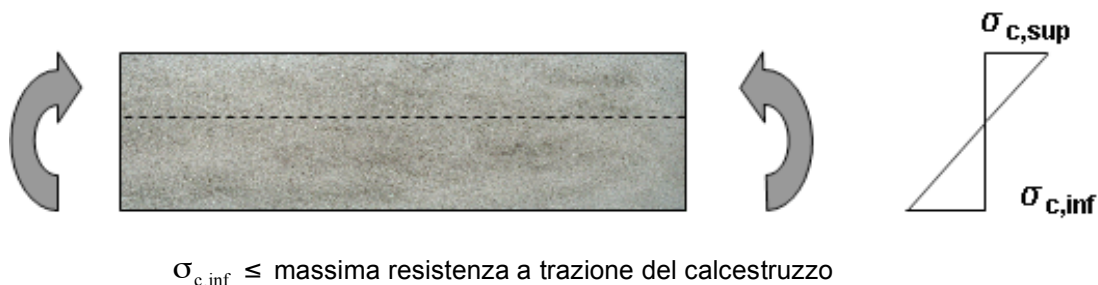


Figura 1. Schema di carico e di sforzo su una pavimentazione interamente reagente.

2. **Struttura fessurata**; in questo caso si possono distinguere:

a. Pavimenti con armatura convenzionale.

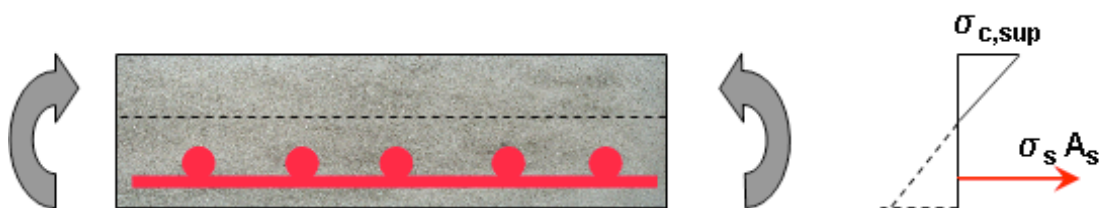


Figura 2. Schema di carico e di sforzo su una pavimentazione rinforzata con rete o barre di armatura.

La progettazione avviene affidando totalmente le sollecitazioni di trazione che nascono nel pavimento alla rete elettrosaldata, posta generalmente su uno strato inferiore (per il momento positivo) ed uno strato superiore (per il momento negativo).

b. Pavimenti di calcestruzzo fibrorinforzato con armatura convenzionale.

In questo caso la rete elettrosaldata è generalmente posata sul fondo della pavimentazione. La resistenza a trazione dovuta al momento positivo (fibre inferiori tese) è prevalentemente affidata alla rete e alle fibre mentre la resistenza a trazione dovuto al momento negativo (fibre superiori tese) è affidata alle fibre che svolgono una funzione strutturale.

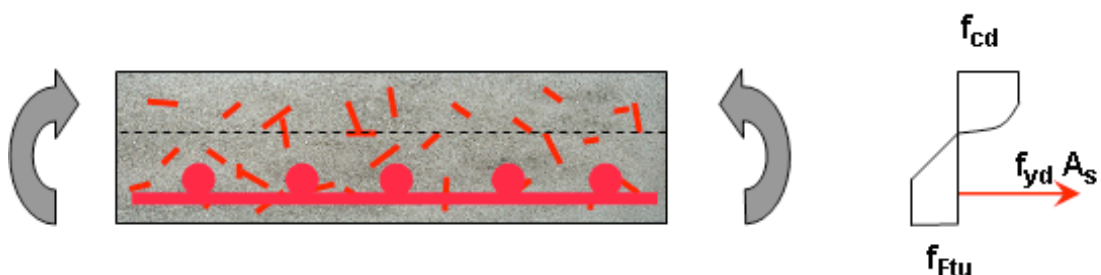


Figura 3. Schema di carico e di sforzo su una pavimentazione in calcestruzzo fibrorinforzato con rete o barre di armatura.

c. Pavimenti di calcestruzzo fibrorinforzato senza armatura convenzionale.

In quest'ultimo caso la resistenza a trazione, sia per il momento positivo sia per il momento negativo, è affidata alle sole fibre che hanno quindi funzione strutturale. Dal momento che il fibrorinforzo si attiva solo dopo la microfessurazione della matrice cementizia, è preferibile l'utilizzo di metodi di

calcolo che possano tenere in adeguata considerazione le notevoli capacità di resistenza post-fessurazione e che consentano di sfruttare appieno tutte le risorse di energia che il calcestruzzo rinforzato con fibre è in grado di offrire. I metodi di analisi in grado di tenere in considerazione il comportamento non lineare del materiale, già presenti nelle normative (TR 34, 2003; UNI 11146, 2005; CNR DT 204, 2006), sono basati sulla *teoria delle linee di plasticizzazione o di rottura* (Yield-Line Method; Johansen, 1962) o sulla *Meccanica della Frattura Non Lineare* (NLFM; Hillerborg et al., 1976).

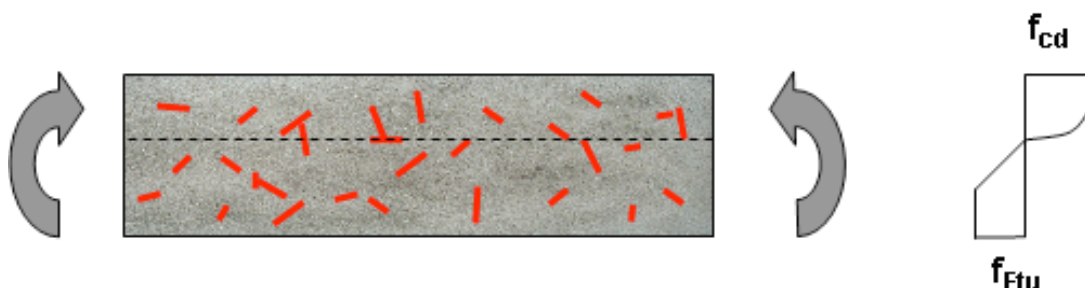


Figura 4. Schema di carico e di sforzo su una pavimentazione in calcestruzzo fibrorinforzato.

Nelle tipologie 2b e 2c possono essere aggiunte fibre non strutturali al solo scopo di migliorare il comportamento al ritiro plastico (calcestruzzo rinforzato con fibre ibride).

Le presenti Linee Guida di Conpaviper riguardano le prescrizioni per la progettazione di pavimentazioni su massiciata nell'ipotesi di utilizzo di un rinforzo fibroso in sostituzione parziale o totale della rete di armatura tradizionale (tipologie 2b e 2c).

Nella realizzazione di un capitolato per il calcestruzzo fibrorinforzato, nel quale le fibre sostituiscono, almeno in parte, l'armatura (casi 2b e 2c), è opportuno partire dalle prescrizioni già previste per il calcestruzzo privo di fibre e aggiungere delle classi prestazionali che possano caratterizzare le proprietà meccaniche offerte dalle fibre in relazione alle prestazioni richieste.

La classificazione del calcestruzzo fibrorinforzato si dovrà basare sulla tenacità, definita come resistenza opposta dal materiale all'avanzamento del processo di frattura, che rappresenta una proprietà intrinseca del materiale stesso. Nelle situazioni in cui il fibrorinforzo intende sostituire l'armatura convenzionale, la tenacità è quindi il vero parametro prestazionale.

La progettazione, nell'ipotesi di sezione non fessurata o armata in modo tradizionale con rete elettrosaldata (casi 1 e 2a), è invece differente in quanto la prestazione "tenacità" non è richiesta al calcestruzzo ordinario (senza fibre) grazie alla presenza dell'armatura. In queste situazioni, bassi dosaggi di fibre possono essere aggiunti per altri scopi come, ad esempio, la riduzione della fessurazione da ritiro, soprattutto in fase plastica.

6. Prestazioni minime per l'utilizzo dei calcestruzzi fibrorinforzati nella realizzazione dei pavimenti

Al fine di utilizzare il calcestruzzo fibrorinforzato nelle applicazioni strutturali (dove le fibre sostituiscono l'armatura per la resistenza a flessione del pavimento), è necessario avere la presenza di fibre in tutto il volume della struttura; tale requisito può essere garantito attraverso un valore minimo di tenacità, in accordo con la richiesta di una prestazione minima, tipica per i materiali strutturali. Infatti, un dosaggio troppo basso di fibre comporterebbe la presenza di zone senza fibrorinforzo che ridurrebbero notevolmente la tenacità del materiale.

I parametri che si adottano per controllare la prestazione minima riguardano i rapporti tra i valori medi dei parametri sperimentali ottenuti dalle prove di flessione secondo la UNI 14651 (2007):

$$f_{R,1m} / f_{Lm} \geq 0.35 \quad (2)$$

$$f_{R,3m} / f_{Lm} \geq 0.25 \quad (3)$$

dove:

$f_{R,1m}$ rappresenta il valore medio della resistenza residua a trazione valutata per $CMOD_1 = 0,5$ mm con la UNI EN 14651 (2007),

$f_{R,3m}$ rappresenta il valore medio della resistenza residua a trazione valutata per $CMOD_1 = 2,5$ mm e

f_{Lm} il valore medio della resistenza di picco rilevata nell'intervallo di apertura di fessura $0 \div 0.05$ mm (UNI EN 14651) (Fig. A.2).

Nelle applicazioni strutturali generiche questi rapporti sono riferiti ai valori caratteristici delle grandezze in gioco; nel caso specifico delle pavimentazioni industriali, cioè di

strutture dotate di grandi possibilità di redistribuzione degli sforzi, tale rapporto può essere riferito ai valori medi.

Le prestazioni minime definite in precedenza non sono richieste al calcestruzzo fibrorinforzato impiegato solo per il controllo della fessurazione da ritiro.

7. Prescrizioni per la matrice di calcestruzzo

I requisiti prestazionali del calcestruzzo rinforzato con fibre devono essere conformi al Capitolato PAVICAL per quanto riguarda la classe di resistenza (min. C25/30), la classe di esposizione (prospetto 4, UNI 11104), la consistenza (UNI EN 206-1), il contenuto di aria ($\leq 3\%$), il ritiro ($\leq 500 \mu\text{m/m}$) e l'omogeneità (UNI EN 206-1).

8. Classi prestazionali per la tenacità del calcestruzzo fibrorinforzato

Le principali prestazioni che devono essere specificate nel Capitolato sono:

- la classe di resistenza a compressione (minimo C25/30);
- la classe di tenacità che dovrà essere superiore ad un valore minimo indicato nel paragrafo precedente;
- le prestazioni allo stato fresco, inclusa la classe di consistenza, che dovranno essere garantite anche dopo l'aggiunta di fibre;
- la distribuzione uniforme delle fibre nell'impasto che dovrà essere verificata al momento del getto.

Con riferimento alla tenacità, poiché i pavimenti sono governati prevalentemente dalle condizioni di esercizio, la resistenza che influenza maggiormente il comportamento globale del pavimento è quella relativa alle piccole aperture di fessura (rappresentata dal parametro $f_{R,1}$ della UNI EN 14651). Per caratterizzare il comportamento allo Stato Limite Ultimo, si fa riferimento alla resistenza residua $f_{R,3}$.

La Tabella 1 riporta cinque classi prestazionali per il FRC, espresse in funzione dei valori caratteristici della resistenza residua $f_{R,1k}$ e del rapporto tra i valori caratteristici $f_{R,3k}/f_{R,1k}$. Tale classificazione non riguarda il calcestruzzo fibrorinforzato impiegato solo per il controllo della fessurazione da ritiro.

**Linee Guida
CONPAVIPER**

per la prescrizione di calcestruzzi fibrorinforzati per la realizzazione di pavimentazioni

Classe	$f_{R,1k}$ [MPa]	$f_{R,3k}/f_{R,1k}$ [-]
a	≥ 0.9	≥ 0.6
b	≥ 1.1	≥ 0.6
c	≥ 1.3	≥ 0.7
d	≥ 1.5	≥ 0.7
e	≥ 1.7	≥ 0.8

Tabella 1 – Parametri prestazionali minimi per il FRC in funzione delle diverse tipologie di pavimentazione previste dalla UNI 11146 (2005).

9. Progettazione di pavimenti in calcestruzzo fibrorinforzato

Le pavimentazioni maggiormente impegnate dal punto di vista strutturale, sia per l'intensità dei carichi sia per la deformabilità del sottofondo, dovranno essere realizzate con FRC dotato di adeguata tenacità. Per le tipologie di pavimentazione previste dalla norma UNI 11146 (2005), la Tabella 2 suggerisce le classi prestazionali minime per il calcestruzzo fibrorinforzato, riportate in Tabella 1. In ogni caso, la pavimentazione dovrà essere calcolata e verificata rispetto alle richieste dal Committente, tenendo conto delle effettive condizioni di carico e della portanza del sottofondo, per le quali il Progettista potrà richiedere al Fornitore del calcestruzzo fibrorinforzato valori prestazionali superiori a quelli riportati in Tabella 1. Infatti, tali valori devono essere considerati come valori minimi, da soddisfare contemporaneamente (sia f_{R1} sia per f_{R1}/f_{R3}), in funzione della tipologia di pavimentazione.

Poiché la presenza del fibrorinforzo tende a far perdere lavorabilità all'impasto, il pre confezionatore dovrà intervenire nel mix design (con la percentuale dei fini e/o additivi) per garantire la classe di consistenza richiesta.

Particolare attenzione dovrà essere prestata alla progettazione della miscela per garantire la pompabilità dell'impasto.

Le prestazioni devono essere garantite in tutte le zone della pavimentazione.

**Linee Guida
CONPAVIPER**

per la prescrizione di calcestruzzi fibrorinforzati per la realizzazione di pavimentazioni

CLASSIFICAZIONE DEI PAVIMENTI INDUSTRIALI IN BASE ALL'UTILIZZO (UNI 11146:2005)			Classi di Tenacità consigliate
Tipo	Campi di impiego prevalenti	Condizioni di carico più frequenti	
1	Uffici, marciapiedi, cantine Disimpegni	Statiche e dinamiche non comprese nei tipi successivi	a,b,c
2	Autorimesse, piazzali	Automezzi su pneumatici di massa totale $\leq 3,5$ t	b,c,d
3	Magazzini e industria con uso occasionale di transpallets presenza di scaffalature leggere. Piazzali autorimesse	Carrelli elevatori con pneumatici di massa totale $\leq 2,5$ t Scaffalature aventi carico massimo ≤ 30 kN per appoggio Automezzi su pneumatici di massa totale ≤ 13 t	c,d,e
4	Magazzini grande distribuzione e industria con uso intensivo di carrelli elevatori e presenza di scaffalature	Carrelli elevatori con pneumatici di massa totale $>2,5$ t Transpallet con massa totale ≤ 11 t Carrelli elevatori con ruote piene di massa totale $\leq 4,5$ t Scaffalature aventi carico massimo ≤ 30 kN/appoggio Automezzi su pneumatici di massa totale ≤ 30 t	d,e
5	Industria, scaffalature, moli e banchine portuali e carichi speciali, piazzali.	Transpallets con massa totale >11 t Carrelli elevatori con ruote piene di massa totale $>4,5$ t Scaffalature aventi carico massimo >30 kN/appoggio Automezzi su pneumatici di massa totale >30 t	e

Tabella 2 – Classificazione pavimenti industriali e classi di tenacità minime consigliate.

10. Controllo della fessurazione da ritiro

La fessurazione da ritiro in fase plastica è legata principalmente al comportamento della matrice cementizia e alle condizioni ambientali; il fenomeno può essere contrastato con l'utilizzo di un basso rapporto acqua/cemento, con agenti antiritiro SRA ("Shrinkage Reducing Admixtures") e/o di microfibre. Il contributo offerto dalle microfibre alla fessurazione da ritiro può essere valutato attraverso prove sperimentali di ritiro impedito, come specificato da ASTM C1579-06 e da AASHTO PP34 (2006).

Al fine di contenere i rischi della fessurazione da ritiro plastico in fase di indurimento, rivestono particolare importanza le modalità di maturazione del calcestruzzo, per le quali si può far ricorso all'utilizzo di agenti di stagionatura.

In accordo con il capitolato PAVICAL, il ritiro libero del calcestruzzo, misurato secondo la norma UNI 11307 (2008) a 28 giorni di maturazione, non deve essere superiore a 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ per pavimenti con giunti di contrazione; nel caso di pavimenti senza giunti (di contrazione), sono preferibili valori inferiori del ritiro libero.

11. Durabilità delle pavimentazioni in FRC

La durabilità di una struttura è funzione dell'ambiente (azioni meccaniche, agenti climatici e chimici), della progettazione, dell'esecuzione, dei materiali utilizzati e della manutenzione.

In accordo con il **D.M. 14/01/08**, il concetto di vita utile di una struttura può essere esteso alle pavimentazioni. Le Norme Tecniche definiscono infatti la durabilità come: *“conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e delle strutture, proprietà essenziale affinché i livelli di sicurezza vengano garantiti durante tutta la vita utile di progetto. La vita utile di progetto (vita nominale) è il periodo di tempo (numero di anni) nel quale la struttura, purchè soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata.”*

Per i pavimenti valgono regole simili a quelle delle strutture in calcestruzzo, come previsto dalla UNI EN 206-1, considerando la classe di esposizione, la tipologia del rivestimento superficiale e la presenza eventuale di armature tradizionali in aggiunta al fibrorinforzo.

Favorendo la riduzione dell'ampiezza delle microfessure, le fibre, disperse in maniera uniforme nell'impasto cementizio, incrementano la durabilità dei pavimenti in FRC.

Il trattamento superficiale ed il rivestimento finale della pavimentazione dovranno garantire una finitura omogenea in modo da limitare affioramenti di fibre e/o fenomeni di degrado del pavimento.

Occorre inoltre prevedere, nella vita utile del pavimento, un adeguato piano di manutenzione dei giunti e del rivestimento.

12. Pompabilità del FRC

Nel caso fosse necessario garantire la pompabilità del FRC, occorre specificarlo nella prescrizione del calcestruzzo. Il produttore dovrà proporzionare conseguentemente le materie prime, in funzione delle loro caratteristiche, in modo da mantenere la conformità del prodotto agli altri parametri progettuali.

13. Controllo di qualità dei pavimenti in FRC

La realizzazione di pavimenti in calcestruzzo fibrorinforzato va sottoposta costantemente ad un controllo che assicuri la conformità dei prodotti ai requisiti di funzionalità, durabilità e di resistenza richiesti.

Poiché, come già evidenziato in precedenza, la resistenza a compressione del calcestruzzo rinforzato con modesti dosaggi di fibre ($V_f < 0,5\%$) è poco influenzata dalla presenza del fibrorinforzo, per la resistenza a compressione si può fare riferimento alle modalità utilizzate per il calcestruzzo ordinario. Per la valutazione della tenacità del materiale fibrorinforzato si fa invece riferimento alle prove di frattura su campioni di trave come specificato nelle presenti Linee Guida e nella UNI EN 14651 (2007). Per la determinazione del contenuto di fibre nel calcestruzzo allo stato fresco la norma di riferimento è la UNI EN 14721, anche se esplicitamente riferita alla fibre metalliche.

La valutazione preliminare delle prestazioni del calcestruzzo fibrorinforzato è consigliata nel caso di pavimenti di grandi dimensioni e/o di classe “**3-4-5**” (Tabella 2).

L’Acquirente deve disporre il controllo di conformità eseguendolo direttamente o incaricando, ove preventivamente concordato, un Laboratorio o un suo consulente esterno. Nel caso richieda una verifica del prodotto in consegna, identificherà l’autobetoniera su cui si effettueranno le prove prima dello scarico.

L’Acquirente e il Fornitore dovranno assicurare la presenza di un responsabile, o di un suo incaricato, per i prelievi in contraddittorio. In ogni caso l’Acquirente potrà procedere al prelievo di campioni di calcestruzzo.

Il controllo di conformità va eseguito indipendentemente dal controllo di accettazione che, come previsto per legge, spetta al Direttore Lavori o ad un suo incaricato.

Prelievo dei provini

E' previsto il prelievo di due campioni da sottoporre a prova di compressione (UNI EN 12390-3) ogni 200 m³ di pavimento e comunque ogni giorno in cui è previsto un getto.

Per la valutazione della tenacità del calcestruzzo fibrorinforzato, il controllo di conformità prevede un prelievo di almeno tre campioni di trave (UNI EN 14651) ogni 1000 m³, con un minimo di tre campioni.

I controlli relativi alla tenacità del materiale sono da intendersi obbligatori per pavimenti appartenenti alle classi "3-4-5" (Tabella 2).

Dovrà essere redatto un verbale di prelievo a cura dell'Acquirente, sul quale dovranno essere registrati i seguenti dati:

- indicazione di tutte le determinazioni eseguite o da eseguirsi sulla base del campione prelevato;
- il numero e la dimensione dei provini confezionati;
- il tipo di casseforme utilizzate;
- l'identificazione dei provini;
- l'indicazione delle condizioni di stagionatura che l'Acquirente del pavimento assicurerà ai provini.

Il prelievo si considererà in contraddittorio nel caso sia sottoscritto da rappresentanti del Fornitore e dell'Acquirente. Copia del verbale di prelievo, sottoscritto dalle Parti, deve essere consegnata all'altra Parte.

Il controllo di conformità è soddisfatto se, per ogni prelievo, risultano verificate tutte le condizioni riportate nel seguito:

- 1) $f_{R,1m} / f_{Lm} \geq 0.35$
- 2) $f_{R,3m} / f_{Lm} \geq 0.25$
- 3) $f_{R,3k} / f_{R,1k} \geq 0.6/0.7/0.8$ in funzione della classe di tenacità di progetto (vedi Tab.1), adottando convenzionalmente $f_{R,1k} = f_{R,1m}/K_A$ e $f_{R,3k} = f_{R,3m}/K_A$;
- 4) $f_{R,1m} \geq f_{R,1k} \cdot K_A$

avendo indicato con:

$f_{R,1m}$ la resistenza residua media corrispondente ad un'apertura di fessura pari a $CMOD_1$ (UNI EN 14651);

$f_{R,3m}$ la resistenza residua media corrispondente ad un'apertura di fessura pari a $CMOD_3$ (UNI EN 14651);

Linee Guida CONPAVIPER

per la prescrizione di calcestruzzi fibrorinforzati per la realizzazione di pavimentazioni

f_{Lm} il valore medio della resistenza di picco rilevata nell'intervallo di apertura di fessura $0 \div 0.05$ mm (UNI EN 14651);

$f_{R,1k}$ la resistenza residua caratteristica corrispondente ad un'apertura di fessura pari a $CMOD_1$ (UNI EN 14651), prescritta dal progettista;

K_A un coefficiente che tiene conto della dispersione dei risultati sperimentali da assumersi pari a **1.20**;

Per la valutazione dell'omogeneità delle fibre sono previsti due prelievi (ciascuno di due campioni, uno al versamento di 1/3 ed uno al versamento completo del calcestruzzo dell'autobetoniera) ogni 100 m^3 di getto e comunque ogni giorno in cui è previsto un getto. Il controllo del contenuto di fibre nel calcestruzzo fresco avviene pesando con una bilancia (avente precisione almeno di 0,1 grammi) il quantitativo di fibre presenti all'interno di un volume standard di **10 litri** di calcestruzzo allo stato fresco.

La metodologia di prova consiste nel compattare il calcestruzzo fibrorinforzato subito dopo averlo posto nel contenitore, nel dilavare con acqua il volume campione, nel raccogliere le fibre ed infine pesarle solo dopo averle lasciate asciugare. Il contenuto di fibre sarà quindi calcolato come:

$$C = m / V$$

Avendo indicato con:

C : contenuto di fibre (kg/m^3);

m : massa delle fibre (grammi);

V : volume del campione (litri)

In alternativa al controllo del dosaggio di fibre nel calcestruzzo fresco, si può raddoppiare il numero dei campioni da sottoporre al controllo della tenacità.

APPENDICE

A1. Metodi di calcolo non lineare

I metodi di calcolo generalmente adottati per il dimensionamento di pavimentazioni industriali si basano sul comportamento elastico di una singola piastra su appoggio continuo alla Winkler. Tali metodi prevedono che la tensione massima di trazione, determinata con la teorica classica o con calcolo elastico, venga confrontata con la resistenza offerta dal materiale, naturalmente ridotta di un opportuno coefficiente di sicurezza.

Nel caso di una pavimentazione in calcestruzzo fibrorinforzato, una analisi elastica non considera le notevoli capacità di resistenza (residua post-picco) e non consente di sfruttare appieno tutte le risorse energetiche che il calcestruzzo rinforzato con fibre è in grado di offrire dopo la fessurazione della matrice cementizia.

Per questo motivo, studi recenti hanno evidenziato l'opportunità di analizzare le pavimentazioni in FRC con metodi in grado di tenere in considerazione il comportamento non lineare del materiale, basandosi sulla teoria delle linee di plasticizzazione o di rottura (Yield Line Method) o sulla Meccanica della Frattura Non Lineare (NLFM, Non Linear Fracture Mechanics).

L'analisi limite basata sulle **linee di rottura** permette di valutare il carico ultimo se il meccanismo di collasso ed il rispettivo panorama fessurativo sono ben definiti.

Nell'applicare il metodo occorre fare alcune osservazioni: in primo luogo si esclude la possibilità di un collasso per taglio, la perdita d'aderenza (di una eventuale armatura ordinaria) e la rottura lato calcestruzzo; inoltre non si considera la rottura sezionale prima dello sviluppo dell'intero panorama fessurativo. Per l'analisi con il metodo delle linee di rottura si utilizza un approccio cinematicamente ammissibile: si ipotizza cioè la formazione di un numero di cerniere plastiche tale da convertire la struttura in un meccanismo (linea di rottura), compatibile con i vincoli.

Il calcolo basato sulla **meccanica della frattura non lineare** si avvicina all'effettivo comportamento del materiale in quanto sfrutta l'intera risorsa di resistenza post-picco del calcestruzzo fibrorinforzato. Grazie alla resistenza residua post-fessurazione del FRC, infatti, una volta raggiunta la tensione di prima fessurazione nel punto più sollecitato della

Linee Guida CONPAVIPER

per la prescrizione di calcestruzzi fibrorinforzati per la realizzazione di pavimentazioni

struttura, il carico può ancora aumentare sfruttando le notevoli capacità di redistribuzione degli sforzi in strutture fortemente iperstatiche come le pavimentazioni, permettendo così alla fessura di propagarsi fino alla formazione di un meccanismo di collasso (Fig. A.1). L'importanza della resistenza residua del fibrorinforzato è dimostrata dal fatto che il carico corrispondente alla formazione del meccanismo di collasso risulta $4/5$ volte superiore al carico massimo determinabile con il calcolo elastico.

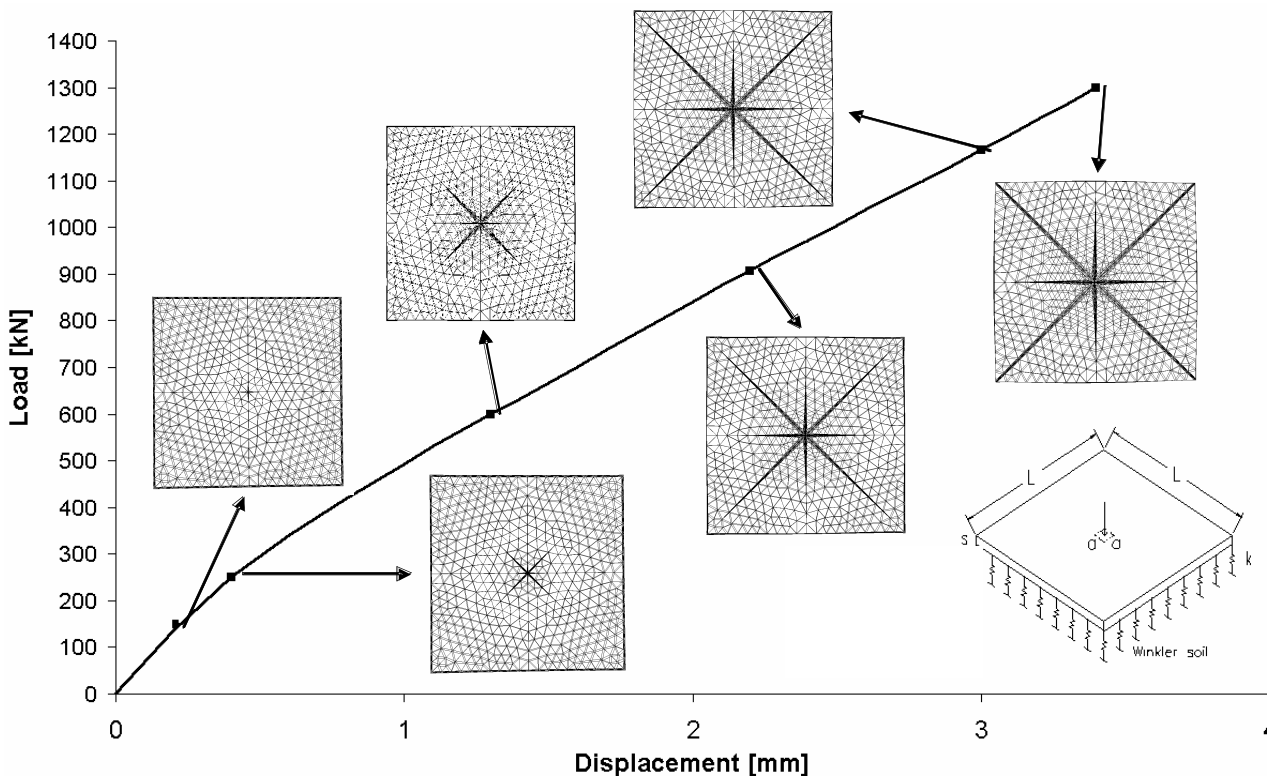


Figura A.1. Comportamento globale di una pavimentazione: sviluppo del quadro fessurativo.

A2. Caratteristiche meccaniche del calcestruzzo FRC

La resistenza a compressione, a trazione ed il modulo elastico di calcestruzzi rinforzati con limitate percentuali volumetriche di fibre ($\leq 0,5\%$) sono molto simili a quelle della sola matrice di calcestruzzo. Il calcestruzzo fibrorinforzato è invece particolarmente performante per la resistenza residua a trazione che è in grado di esercitare dopo la microfessurazione della matrice. Nel presente documento, analogamente a quanto indicato in molte normative sui calcestruzzi fibrorinforzati, questa caratteristica è convenzionalmente definita “tenacità”; quest’ultima è presa come parametro di riferimento per la progettazione strutturale nelle recenti istruzioni CNR – DT 204 (2006).

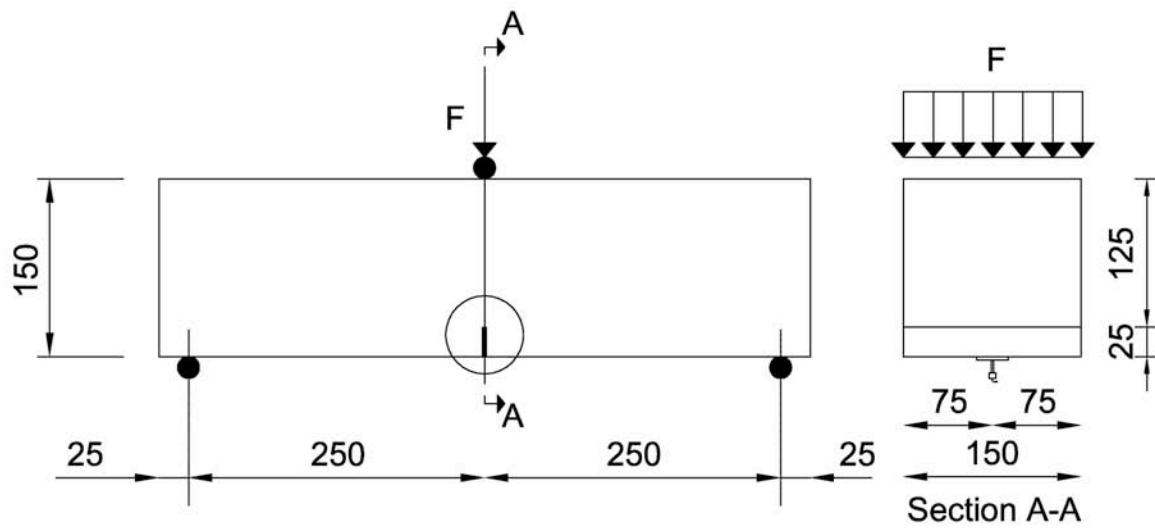
I principali parametri che governano la tenacità del calcestruzzo fibrorinforzato sono riportati nel seguito:

- materiale utilizzato per le fibre (acciaio, polimeri, vetro, ...);
- dosaggio delle fibre;
- geometria delle fibre (lunghezza, diametro equivalente e forma);
- composizione della matrice;
- aderenza fibra-matrice (che è fortemente influenzata dalla composizione della matrice);
- distribuzione delle fibre all’interno della matrice.

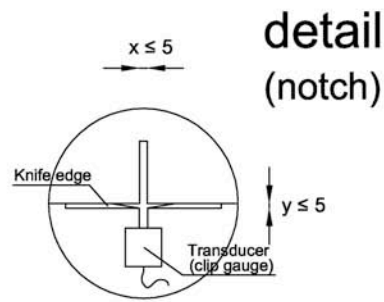
La tenacità è misurata attraverso la prova di flessione prevista dalla UNI EN 14651 (2007). In accordo a tale norma, i provini prismatici, intagliati in mezzeria, sono soggetti ad una prova di flessione su tre punti di carico in controllo di CMOD (Crack Mouth Opening Displacement), ovvero lo spostamento rilevato fra due punti alla base dell’intaglio (Fig. A.2).

Linee Guida CONPAVIPER

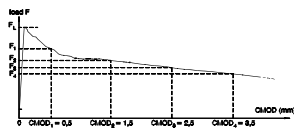
per la prescrizione di calcestruzzi fibrorinforzati per la realizzazione di pavimentazioni



all sizes in mm



(a)



(b)

Figura A.2. Geometria del provino da sottoporre a prova di flessione in accordo alla UNI EN 14651 (a); tipica curva carico – apertura di fessura per un calcestruzzo fibrorinforzato

(b).

**Linee Guida
CONPAVIPER**

per la prescrizione di calcestruzzi fibrorinforzati per la realizzazione di pavimentazioni

Il calcestruzzo fibrorinforzato viene classificato sulla base di valori puntuali della tensione nominale $f_{R,j}$, corrispondenti a prefissati valori di CMOD (Fig. A.2b) e derivati dal carico F_j :

$$f_{R,j} = \frac{3 F_j l}{2 b h_{sp}^2} \quad (1)$$

dove:

$f_{R,j}$ è la resistenza residua a trazione valutata per CMOD = CMOD_j (j = 1, 2, 3, 4) [N/mm²];

F_j è il carico corrispondente a CMOD = CMOD_j o $\delta = \delta_j$ (j = 1,2,3,4) [N];

l è la luce del provino [mm];

b è la larghezza del provino [150 mm];

h_{sp} è la distanza tra l'apice dell'intaglio e la superficie superiore del provino [125 mm].

In sostituzione dei valori di resistenza residua ottenuti secondo la UNI EN 14651 (2007), si possono utilizzare i valori di resistenza equivalente calcolati dalla UNI 11039 (2003), purché siano trasformati nei valori $f_{R,1}$ e $f_{R,3}$ (della UNI EN 14651) con fattori di trasformazione verificati con opportuna sperimentazione su un numero significativo di campioni.

A3. Verifica dei limiti sulle resistenze residue del FRC

Di seguito si riporta un esempio di calcolo dei limiti imposti dalle presenti Linee Guida alle resistenze residue del calcestruzzo fibrorinforzato.

L'esempio è riferito ad un calcestruzzo di classe **C25/30** per il quale si può ipotizzare una resistenza a flessione di picco pari a $f_{Lm} = 3.08$ MPa.

Partendo dal valore della resistenza a flessione specificata si possono calcolare, in funzione della classe prestazionale, i valori minimi delle resistenze $f_{R1,m}$ ed $f_{R3,m}$ a partire dal requisito 1) $f_{R,1m} / f_{Lm} \geq 0.35$ e 2) $f_{R,3m} / f_{Lm} \geq 0.25$. Il requisito 3) $f_{R,3m} / f_{R,1m}$ varia a seconda della classe di tenacità di progetto secondo quanto specificato nella Tabella 1, mentre il requisito 4) $f_{R,1m} \geq f_{R,1k} \cdot K_A$ specifica il valore minimo del parametro $f_{R1,m}$ in funzione del valore caratteristico $f_{R1,k}$, prescritto dal progettista in base alla classe di tenacità (Tabella 1), e del coefficiente K_A legato alla dispersione dei risultati. In Tabella A.1 sono riportati i valori numerici relativi all'esempio citato.

Classe	Requisito 1)	Requisito 2)	Requisito 3)	Requisito 4)
	$f_{R,1m} / f_{Lm} \geq 0.35$	$f_{R,3m} / f_{Lm} \geq 0.25$	$f_{R,3m} / f_{R,1m} \geq 0.6/0.7/0.8$	$f_{R,1m} \geq f_{R,1k} \cdot K_A$
	Valore minimo $f_{R,1m}$ [MPa]	Valore minimo $f_{R,3m}$ [MPa]	$f_{R,3m} / f_{R,1m}$ [MPa]	Valore minimo $f_{R,1m}$ [MPa]
a	1.08	0.77	0.6	1.08
b	1.08	0.77	0.6	1.32
c	1.08	0.77	0.7	1.56
d	1.08	0.77	0.7	1.80
e	1.08	0.77	0.8	2.04

Tabella A.1 – Parametri minimi delle resistenze $f_{R1,m}$ ed $f_{R3,m}$ per un calcestruzzo C25/30 con resistenza a flessione di picco $f_{Lm}=3.08$ MPa.