

TECNOLOGIA DEI MATERIALI.

L'utilizzo di fibre polimeriche ibride strutturali nelle pavimentazioni civili ed industriali

ELEMENTI INNOVATIVI RISPETTO ALLE FIBRE METALLICHE E ALLE RETI ELETTRISALDATE

In questo lavoro descriveremo le proprietà dei calcestruzzi fibrorinforzati con fibre polimeriche ibride strutturali RXF54 ed il loro utilizzo nella progettazione delle pavimentazioni civili ed industriali, con l'impiego di un programma di calcolo fondato sulle più aggiornate teorie dei calcestruzzi fibrosi.

Fin dagli anni '80 la Ruredil è impegnata nella ricerca e nello sviluppo di materiali compositi non metallici, con particolare riferimento allo studio di fibre sintetiche strutturali per migliorare le proprietà meccaniche di malte e calcestruzzi. Risale al 1991 il brevetto "Procedimento per l'ottenimento di additivi per compositi cementizi e additivi così ottenuti", che tratta dello studio e realizzazione delle prime fibre di carbonio corte per sostituire quelle d'acciaio nei conglomerati cementizi.

Alla fine del 2001, Ruredil ha introdotto nel settore dei calcestruzzi fibrorinforzati una fibra polimerica ibrida e strutturale denominata RXF54. È una fibra sintetica ibrida strutturale, progettata per migliorare la durabilità e le proprietà meccaniche del calcestruzzo e dello *sprayed concrete* (calcestruzzo proiettato). Essa è costituita da un monofilamento non fibrillato costituito da un copolimero del polipropilene e del polietilene e da una fibra fibrillata di polipropilene, in grado di ridurre, e in alcuni casi eliminare totalmente, il ritiro plastico.

Questa nuova fibra, a differenza delle fibre metalliche, non si corrode, non è magnetica, è resistente al 100% agli acidi, alle basi e in genere a tutti gli ambienti aggressivi, essendo chimicamente inerte.

Per un confronto prestazionale con le fibre metalliche, sono stati realizzati due calcestruzzi fibrorinforzati di identico mix design, impiegando RXF54 e una fibra metallica uncinata, entrambe dosate allo 0,5% in volume. I grafici sforzo deformazione mostrano la perfetta equivalenza prestazionale dei due calcestruzzi in termini di tenacità, secondo i principi della meccanica della frattura. Que-

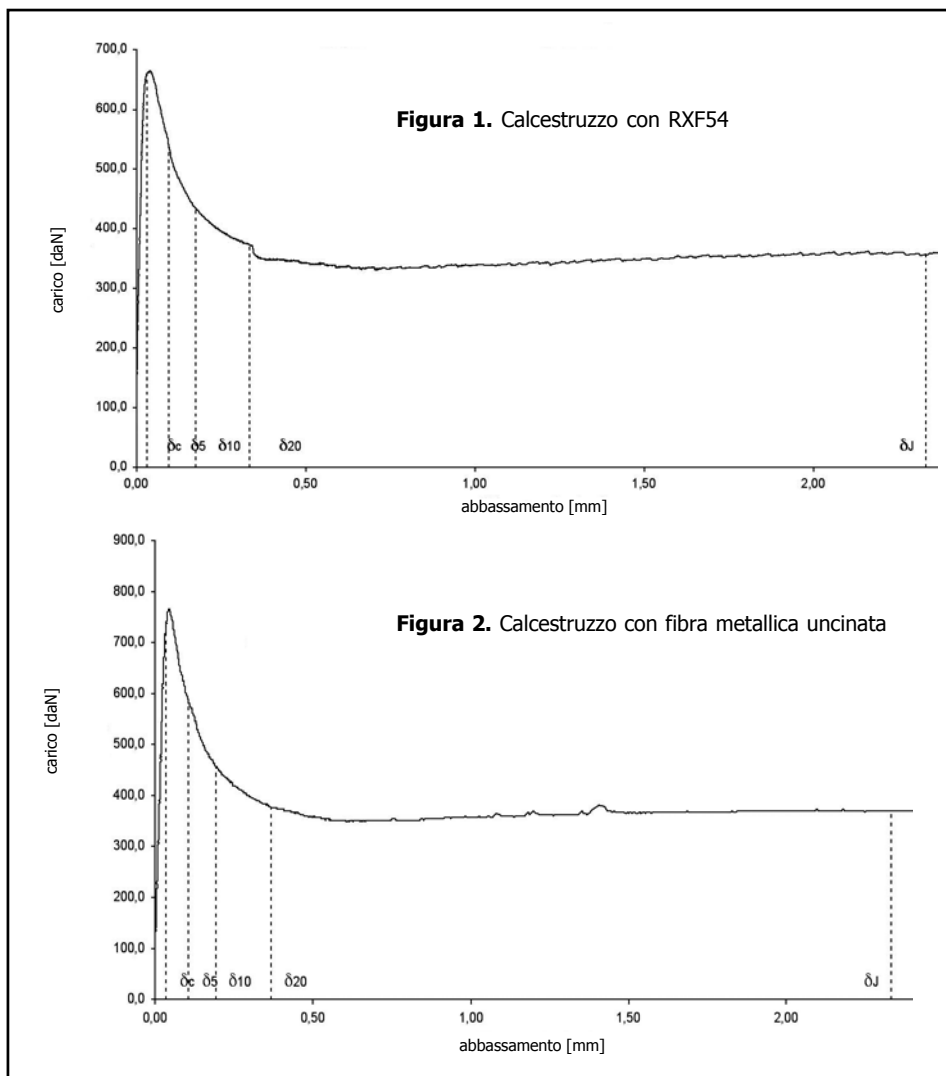
GLI AUTORI.

Il dottor **Giovanni Mantegazza**
è direttore tecnico
della Ruredil Spa.

L'ingegner **Elio Campana**
è il responsabile tecnico commerciale
dell'azienda in Sardegna

telefono: 348.7502598

e-mail: campelio@tiscali.it



sto significa - tenendo conto del peso specifico delle due fibre - che 4,5 kg di RXF54 danno le medesime prestazioni di 40 kg di fibra metallica uncinata, a parità di mix design del calcestruzzo.

Le fibre polimeriche ibride strutturali nelle pavimentazioni.

Per la maggior parte, le pavimentazioni realizzate in Italia non vengono progettate, in quanto considerate opere edili *minori*. Sono realizzate, senza alcuna prescrizione, dall'impresa o dal fornitore di calcestruzzo preconfezionato. Questi operatori per consuetudine prevedono la messa in opera della pavimentazione con una rete elettrosaldata, senza sapere il perché o pensando che serva a distribuire i carichi. In realtà l'unica funzione della rete elettrosaldata nelle pavimentazioni poggianti direttamente sul terreno - *slab on ground* - è quella di contenere gli effetti meccanici di trazione generati dalle azioni termoigrometriche-gradiente termico che si instaura tra la superficie e il fondo nelle prime ore di maturazione del getto di calcestruzzo.

Ruredil, attraverso il programma di calcolo di seguito illustrato, offre agli operatori del settore (progettisti, pavimentisti, fornitori di calcestruzzo preconfezionato, imprese) uno strumento semplice ed efficace, che consente di progettare correttamente le pavimentazioni non lasciando nulla al caso o all'improvvisazione.

L'innovazione introdotta da Ruredil consiste nell'aver correlato i risultati numerici (indici di tenacità, resistenza a trazione residua, ecc.) provenienti da una propria ricerca eseguita su centinaia di calcestruzzi fibrorinforzati (RXF54) con le teorie più avanzate della progettazione delle pavimentazioni oggi disponibili. Da questo connubio - risultati sperimentali e teoria progettuale - è stato realizzato un programma di calcolo che centra l'obiettivo di affrontare la progettazione delle pavimentazioni da un punto di vista olistico perchè consente di modificare, secondo le specifiche richieste progettuali della pavimentazione, lo spessore, la resistenza a trazione residua, il modulo elastico e il dosaggio di fibre RXF54.

In conclusione le fibre RXF54 rappresentano un avanzamento tecnologico rispetto:

- alle fibre metalliche, soggette a corrosione chimica;
- alle reti elettrosaldate, che non danno nessun contributo meccanico;
- a quelle fibre sintetiche di cui non è dimostrata sperimentalmente e teoricamente l'efficacia nel progettare le proprietà delle pavimentazioni.

Programma RXF54 - Floor Design.

La Ruredil, sulla base delle proprietà chimico-fisico-mecchaniche delle fibre polimeriche ibride strutturali RXF54, ha ideato un sistema per la progettazione delle pavimentazioni civili industriali poggianti sul terreno, eliminando completamente le reti elettrosaldate e le fibre metalliche. Questo approccio innovativo raggiunge il fine di progettare correttamente le prestazioni meccaniche del pavimento con l'impiego di fibre sintetiche strutturali ed evita l'insorgere di feno-



Nuovo Polo fieristico di Milano:
pavimentazione della passerella
dell'asse centrale
realizzata in calcestruzzo
fibrorinforzato con RXF54 Ruredil
(lunghezza circa 1 km)



Centro commerciale di Carpi:
pavimentazione industriale di circa 70.000 mq
realizzata in calcestruzzo fibrorinforzato
con RXF54 Ruredil.

meni di corrosione (cui vanno soggette reti e fibre metalliche) che comprometterebbero le prestazioni meccaniche della pavimentazione stessa.

Vediamo il criterio di dimensionamento. Il programma calcola il dosaggio di fibre RXF54 Ruredil necessario in una pavimentazione di calcestruzzo una volta assegnato lo spessore. Si considerano i casi di:

- carico di risultante P applicato su un cerchio di diametro a disposto lontano dai bordi della lastra;
- due carichi concentrati di risultante P ciascuno applicati su due cerchi di diametro a ciascuno, lontani dai bordi; i centri dei cerchi sono distanti l .

La valutazione della quantità di fibre necessaria per un dato spessore è effettuata nello spirito della *Yield Line Theory*, secondo quanto indicato nei lavori citati in bibliografia.

Si considera un pavimento appoggiato su suolo elastico alla Winkler. Il pavimento si fessura per il momento positivo presente sotto il carico.

Spessore e dosaggio di fibre sono determinati in modo che il calcestruzzo non si fessuri per il massimo momento negativo presente ad una certa distanza dal carico (il massimo momento negativo viene quindi posto uguale al momento di prima fessurazione del calcestruzzo). In altre parole, si considera che per carichi crescenti si produce dapprima la fessurazione a momento positivo sotto il carico (momento massimo). Al crescere del carico aumenta la fessurazione radiale intradossale, finché il massimo momento negativo non è tale da fessurare il calcestruzzo all'estradosso. Questa condizione è considerata lo *Stato Limite Ultimo* del pavimento.

Si considera inoltre che il momento positivo si trasmetta nelle sezioni fessurate grazie alla presenza delle fibre. Per il calcestruzzo fibroso si assume infatti a trazione il legame costitutivo di figura 3 in cui f_{ct} è la resistenza a trazione del calcestruzzo (considerata indipendente dal dosaggio di fibre) e la resistenza residua f_{res} è dovuta alla presenza delle fibre che attraversano la fessura e consentono il passaggio di tensioni di trazione tra i suoi lembi. La resistenza residua dipende da:

- classe del calcestruzzo (R_{ck});
- dosaggio di fibre e tipo di fibre (V_f).

Il legame $f_{res} = f_{res}(R_{ck}, V_f)$ è stato determinato sulla base di risultati sperimentali condotti con diversi dosaggi di fibre RXF54 e diverse classi di calcestruzzo ed è del tipo di figura 4. Il momento flettente M_{res} che si trasmette grazie alla presenza delle fibre in una sezione fessurata è determinato con lo schema di figura 5.

Si sottolinea che il procedimento descritto rappresenta un "calcolo a rottura", pertanto il carico P deve rappresentare la condizione di carico allo Stato Limite Ultimo (tipicamente: carichi permanenti moltiplicati per 1.4 e carichi accidentali moltiplicati per 1.5). Lo stesso deve essere con-

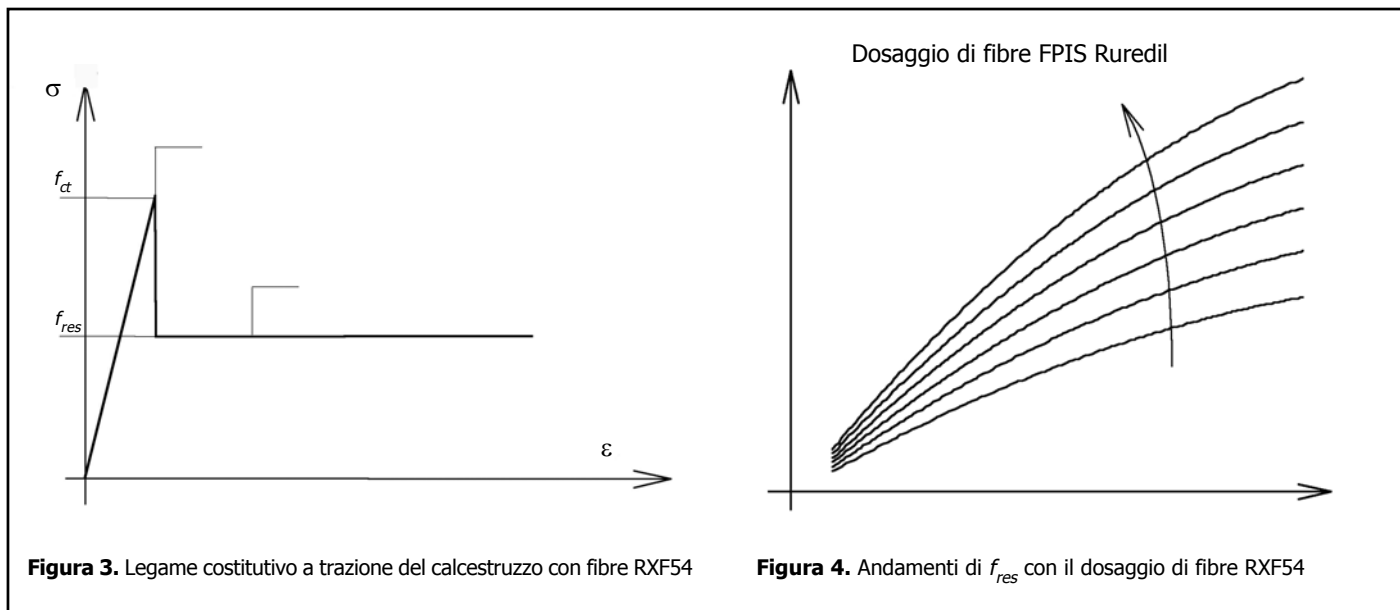


Figura 3. Legame costitutivo a trazione del calcestruzzo con fibre RXF54

Figura 4. Andamenti di f_{res} con il dosaggio di fibre RXF54

siderato per la resistenza a trazione del calcestruzzo che deve rappresentare un valore di calcolo di detto parametro.

Parametri in entrata. Questi i parametri da inserire per il calcolo:

- diametro a dell'area di impronta o delle impronte di carico (cm);
- distanza l tra i centri delle aree di impronta nel caso di due carichi (cm);
- carico P corrispondente alla combinazione di carichi allo Stato Limite Ultimo (kg);
- classe del calcestruzzo (R_{ck} in kg/cm^2); la classe del calcestruzzo deve essere inserita in tutti i casi in quanto viene utilizzata per la valutazione dell'effetto delle fibre (la stessa quantità di fibre produce benefici più evidenti su calcestruzzi di classi elevate);
- resistenza a trazione di calcolo del calcestruzzo (f_{ctd} in kg/cm^2); tale resistenza può, in alternativa, essere valutata automaticamente in funzione della classe del calcestruzzo con la formula

$$f_{ctd} = 0.7 \cdot 1.2 \cdot 0.27 (R_{ck})^{2/3} / 1.6 \quad (R_{ck} \text{ e } f_{ctd} \text{ in } N/mm^2)$$

se è attivata l'opzione "calcola dall' R_{ck} ";

- modulo elastico del calcestruzzo (E_c in kg/cm^2); tale modulo può, in alternativa, essere valutato automaticamente in funzione della classe del calcestruzzo con la formula

$$E_c = 5700 (R_{ck})^{1/2} \quad (R_{ck} \text{ e } E_c \text{ in } N/mm^2)$$

se è attivata l'opzione "calcola dall' R_{ck} ";

- costante elastica di sottofondo (k in kg/cm^3); sono inseriti alcuni valori di riferimento (sottofondo soffice, sottofondo mediocre, sottofondo di riporto costipato, sot-

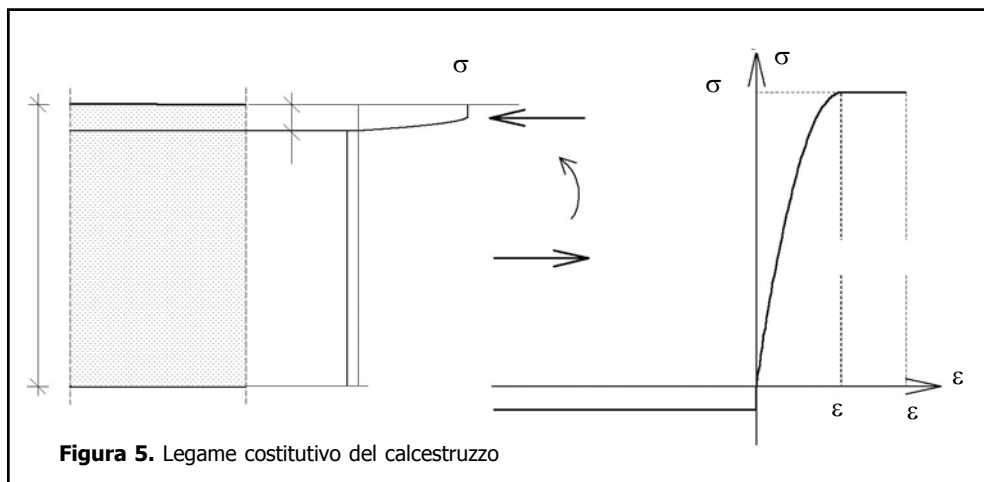


Figura 5. Legame costitutivo del calcestruzzo

to fondo di riporto ben costipato) per i quali si ha rispettivamente $k = 1.5 \text{ kg/cm}^3$; $k = 3 \text{ kg/cm}^3$; $k = 6 \text{ kg/cm}^3$; $k = 10 \text{ kg/cm}^3$;

- spessore desiderato (h in cm); rappresenta un valore di tentativo dello spessore del pavimento.

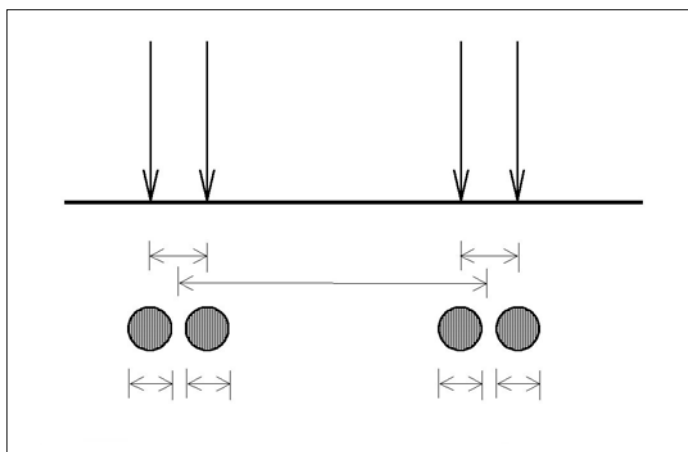
Parametri in uscita. Con i dati appena visti, il programma fornisce:

- un diagramma che mette in relazione lo spessore del pavimento con il dosaggio di fibre necessario (tale diagramma è utile per indirizzare i tentativi successivi qualora il dosaggio di fibre corrispondente allo spessore di tentativo sia troppo elevato o sia possibile ridurre lo spessore;
- il dosaggio di fibre corrispondente allo spessore inserito, determinato con i criteri sopra esposti;
- l'area di carico equivalente, nel caso di due carichi posti ad una certa distanza.

Osservazioni. Il programma prevede un dosaggio minimo di fibre pari a 1.5 kg/m^3 , comunque necessario per contrastare le fessurazioni dovute al ritiro ed alle varia-

zioni termiche. La presenza delle fibre consente così di evitare la messa in opera della rete elettrosaldata. La pavimentazione deve comunque prevedere la presenza di giunti di dilatazione.

Esempio di dimensionamento: asse di autoarticolato



Dati di partenza: asse da $Q=10\ t$ su quattro ruote come da schema qui sopra. Si suppone che il carico si ripartisca equamente sulle quattro ruote:

$$P = 1.5 \cdot Q/4 = 3750\ \text{kg}$$

(il coefficiente 1.5 è introdotto in quanto si effettua un calcolo a rottura);

a = 30 cm diametro dell'impronta di ogni ruota

($a = 2 \cdot (P / \pi q)^{1/2}$, essendo q la pressione di gonfiaggio dei pneumatici);

l = 40 cm distanza tra le ruote più vicine;

l₁ = 300 cm distanza tra le coppie di ruote;

k = 3 kg/cm³ costante di sottofondo;

R_{ck} = 300 kg/cm² classe del calcestruzzo;

v = 0.15 coefficiente di Poisson del calcestruzzo.

Le altre caratteristiche del calcestruzzo (calcolate in funzione di R_{ck}) sono queste:

f_{ctd} = 13.7 kg/cm² resistenza a trazione per flessione di calcolo;

E_c = 312200 kg/cm² modulo elastico.

Calcolo del pavimento. Il calcolo può essere effettuato considerando dapprima solo una coppia di carichi P a distanza l e poi verificando il dimensionamento ottenuto per i casi di carico singolo e di tutti i carichi.

Coppia di carichi P a distanza l - Con questi dati e considerando uno spessore di tentativo $h = 15\ \text{cm}$, si ottiene:

V_f = 1.72 kg/m³ dosaggio di fibre;

a_{eq} = 72.2 cm diametro dell'area di impronta equivalente alle due considerate.

Singolo carico P - Considerando un singolo carico e ancora $h = 15\ \text{cm}$, si ottiene:

V_f = 1.5 kg/m³ dosaggio di fibre.

Presenza di tutti i carichi - Si può schematizzare ogni coppia di carichi vicini come un carico $P_1 = 2P = 7500\ \text{kg}$ distribuito su un cerchio di raggio $a_1 = a_{eq} = 72.2\ \text{cm}$. Si può quindi effettuare il calcolo considerando i due carichi P_1 ciascuno applicato su un cerchio di diametro a_{eq} posti alla distanza $l_1 = 300\ \text{cm}$. Considerando ancora lo spessore di tentativo $h = 15\ \text{cm}$ si ottiene:

V_f = 1.85 kg/m³ dosaggio di fibre;

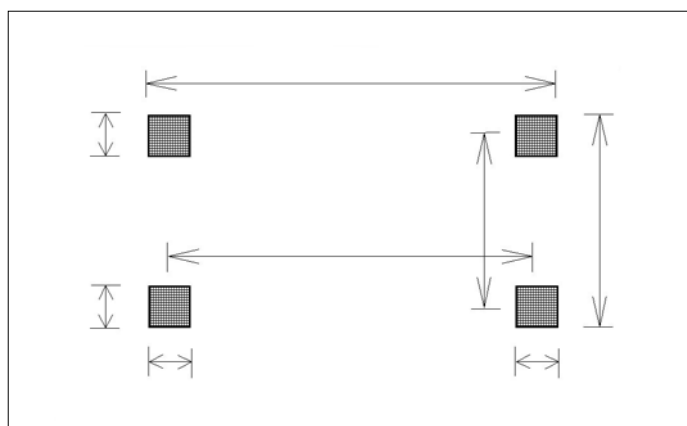
a_{eq} = 187 cm diametro dell'area di impronta equivalente.

In alternativa si può considerare lo spessore $h = 17\ \text{cm}$; si ottiene:

V_f = 1.50 kg/m³ dosaggio di fibre;

a_{eq} = 198 cm diametro dell'area di impronta equivalente.

Esempio di dimensionamento: container



Dati di partenza. Due container sovrapposti, del peso $Q = 12\ \text{t}$ ciascuno, appoggiati al pavimento secondo lo schema qui sopra. Si suppone che il carico si ripartisca equamente sui quattro sostegni:

$$P = (2 \cdot Q / 4) \cdot 1.5 = 9000\ \text{kg}$$

(il coefficiente 1.5 è introdotto in quanto si sta effettuando un calcolo a rottura)

a = 17 cm diametro dell'impronta di ogni appoggio
($a = 2 \cdot (A/\pi)^{1/2}$, essendo $A = 225\ \text{cm}^2$ l'area di impronta effettiva);

l = 235 cm distanza tra gli appoggi più vicini;

l₁ = 595 cm distanza tra gli appoggi più lontani;

k = 10 kg/cm³ costante di sottofondo;

R_{ck} = 300 kg/cm² classe del calcestruzzo;

v = 0.15 coefficiente di Poisson del calcestruzzo.

Le altre caratteristiche del calcestruzzo (calcolate in funzione di R_{ck}) sono:

$f_{ctd} = 13.7 \text{ kg/cm}^2$ resistenza a trazione per flessione di calcolo;

$E_c = 312200 \text{ kg/cm}^2$ modulo elastico.

Calcolo del pavimento. Il calcolo può essere effettuato considerando dapprima solo una coppia di carichi P a distanza l e poi verificando il dimensionamento ottenuto per i casi di carico singolo e di tutti i carichi.

Coppia di carichi P a distanza l - Con questi dati e considerando uno spessore di tentativo $h = 18 \text{ cm}$ si ottiene:

$V_f = 2.58 \text{ kg/m}^3$ dosaggio di fibre;

$a_{eq} = 116 \text{ cm}$ diametro dell'area di impronta equivalente alle due considerate.

Singolo carico P - Considerando un singolo carico e ancora $h = 18 \text{ cm}$ si ottiene:

$V_f = 2.64 \text{ kg/m}^3$ dosaggio di fibre.

Presenza di tutti i carichi - Si può schematizzare ogni coppia di carichi vicini come un carico $P_1 = 2P = 18000 \text{ kg}$ distribuito su un cerchio di raggio $a_1 = a_{eq} = 116 \text{ cm}$. Si può quindi effettuare il calcolo considerando i due carichi P_1 ciascuno applicato su un cerchio di diametro a_{eq} posti alla distanza $l_1 = 595 \text{ cm}$.

Considerando ancora lo spessore di tentativo $h = 18 \text{ cm}$ si ottiene:

$V_f = 2.628 \text{ kg/m}^3$ dosaggio di fibre;

$a_{eq} = 213 \text{ cm}$ diametro dell'area di impronta equivalente.

BIBLIOGRAFIA

Westergaard, H. M. "New formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields", ASCE, vol.113, pp.425-444, 1926.

Johansen, K. W., "Yield-Line Theory", Cement and Concrete Association, London, 1962.

Meyerhof, G. G. "Load-Carrying Capacity of Concrete Pavements", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1962.

Leonards, G. A., Harr, M. E., "Analysis of Concrete Slabs on Ground", ASCE, Vol. 85, pp. 35-58, 1959.

Losberg, A., "Pavements and Slabs on Grade with Structurally Active Reinforcement", ACI Journal, Title 75-66, nov.-dic. 1978.

ACI, 544.4R-88, "Design Considerations for Steel Reinforced Concrete", Reported by ACI Committee 544, 1988.

CBI Report 1:89, Åke Skarendahl, Bo Westerberg, "Handledning för dimensionering av fiberbetonggolv", 1989.

ACI 360R-92, "Design of Slabs on Grade", Reported by ACI Committee 360, 1992.

Soroushian, P., Tlili, A., Alhozaimey, A., Khan, A. "Development and Characterization of Hybrid Polyethylene Fiber Reinforced Cement Composites", ACI Materials Journal, Vol. 90 n. 2, 1993.

Bayasi, Z., Zeng, J. "Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete", ACI Materials Journal, Vol. 90 n. 6, 1993.

Ruredil, "Ruredil X Fiber 54", Scheda tecnica.

Di Prisco, M., Toniolo, G., editors "Proceedings of the International Workshop Structural Applications of Steel Fibre Reinforced Concrete", 2000.

RILEM TC 162-TDF, "Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete - s-e Design Method", Materials and Structures, Vol. 33, March 2000, pp. 75-81.

RILEM TC 162-TDF, "Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete - Bending Test", Materials and Structures, Vol. 35, November 2002, pp. 579-582.