



collegio dei tecnici della industrializzazione edilizia

in collaborazione con  
Dipartimento di Analisi e Progettazione Strutturale  
Università di Napoli Federico II

11° congresso cte  
nuova tecnologia edilizia  
per l'europa  
napoli 7-8-9 novembre 1996





# RESISTENZA CARATTERISTICA DI MATERIALI CEMENTIZI AD ALTISSE PRESTAZIONI

MAURIZIO ACITO, Diplomato alla Scuola di Specializzazione in C. A. "F.lli Pesenti" - Politecnico Milano  
LUIGI CASSAR, Centro Tecnico di Gruppo Italcementi-Ciments Français - Bergamo  
GIAN LUCA GUERRINI, Centro Tecnico di Gruppo Italcementi-Ciments Français - Bergamo  
ANTONIO MIGLIACCI, Dipartimento di Ingegneria Strutturale - Politecnico Milano

## SUMMARY

*In this paper, the results of compression tests performed on high strength concrete specimens are discussed. The concrete had a maximum aggregate size of 3 mm, an aggregate/binder ratio of 2, a silica fume/binder ratio of 0.2 and randomly dispersed steel microfibers of 0, 2 and 4% by volume.*

*A statistical description of the compressive strength is derived and the characteristic strength values as a function of the microfibers volume are evaluated.*

## 1. INTRODUZIONE

L'impiego di un materiale in ambito strutturale richiede una sicura conoscenza delle sue prestazioni meccaniche. Particolarmente significative, ai fini strutturali, sono le resistenze a compressione ed a trazione e, in particolari casi, le resistenze agli urti, alle abrasioni, a cicli di carico ripetuti, ecc. In questi ultimi anni, si richiede poi che un materiale strutturale conservi nel tempo le sue capacità prestazionali, ossia abbia una buona durabilità chimica e fisica, oltreché e meccanica.

Anche il calcestruzzo, in quanto materiale strutturale, deve fornire prestazioni possibilmente costanti nell'arco della vita utile di una struttura. Le capacità prestazionali di un materiale, in generale, sono tra loro correlate in senso positivo, e cioè il miglioramento di una data capacità è accompagnata in genere da un miglioramento delle altre capacità (un aumento della resistenza a compressione di un calcestruzzo è accompagnato da un aumento della sua resistenza a trazione, del suo modulo elastico, ecc.) (01), (02) e (03). Pertanto, l'intera capacità prestazionale può essere stimata anche dalla conoscenza di una sola proprietà significativa.

Nel caso del calcestruzzo tutte le norme classificano il materiale attraverso la sua resistenza caratteristica

a compressione (04). Questa resistenza assume così il significato di parametro fondamentale per la caratterizzazione dei calcestruzzi. Al di là di come la qualità dei componenti, le loro dimensioni e le loro quantità influenzino elevati livelli di qualità, quello che importa per la caratterizzazione di un dato calcestruzzo è la sua resistenza a compressione, misurata convenzionalmente a 28 giorni di stagionatura. Non si esclude, però, proprio ai fini della durabilità, anche la "compattezza" del calcestruzzo, misurata ad esempio attraverso la sua permeabilità, costituisca un parametro altrettanto essenziale.

In questo lavoro si discute il problema della valutazione della resistenza caratteristica di calcestruzzi ad altissima resistenza, anche additivati con fibre di acciaio. Lo studio vuole mettere in evidenza, inoltre, l'effetto del diverso contenuto di fibre impiegate.

## 2. MATERIALI E ATTREZZATURA SPERIMENTALE

I materiali utilizzati in questo studio sono del tipo proposto per la prima volta da H. Bache (05) e sono definiti comunemente DSP (Densified Systems containing homogeneously arranged ultrafine Particles). Si tratta di malte ad altissima resistenza contenenti sabbia di quarzo, microsiline e microfibre d'acciaio ed aventi bassi rapporti acqua/legante, grazie all'utilizzo di superfluidificanti ad alta efficacia.

In particolare, per la preparazione dei provini sono stati utilizzati:

- cemento CEM I 52.5 R, avente una finezza Blaine di 4590 cm<sup>2</sup>/g;
- microsiline in polvere non densificata, avente una superficie specifica (B.E.T.) di 20 m<sup>2</sup>/g;
- aggregato di quarzo di origine alluvionale di elevata purezza (99% SiO<sub>2</sub>), avente dimensioni di 0-3.2 mm;
- superfluidificante acrilico, in soluzione acquosa (contenuto in estratto secco: 30% in massa);
- fibre di acciaio al carbonio non sagomate (lunghezza 6 mm, diametro 0.15 mm).

Le composizioni utilizzate sono riportate in Tab. I.

rapp. microsiline/legante	0.20	0.20	0.20
rapp. superfluidificante/legante	0.02	0.02	0.02
rapp. aggregati/legante	2	2	2
rapp. acqua/legante	0.225	0.225	0.225
fibre (% in volume)	0	2	4
spandimento ASTM, mm	220	205	160

Tabella I. Mix design

Gli impasti sono stati preparati utilizzando un mescolatore planetario Hobart da 15 litri e sono stati quindi caratterizzati allo stato fresco mediante la tavola a scosse ASTM. I provini sono stati confezionati utilizzando stampi in acciaio e vibrati mediante un tavolo ad elevata frequenza di vibrazione (200 Hz). Dopo essere stati lasciati per 24 ore nello stampo, i provini sono stati stagionati in acqua a 20°C fino al momento della prova (normalmente a 28 gg. dalla data di confezionamento).

Per le prove sperimentali è stata utilizzata una macchina di prova universale Controls da 3000 kN con un carico applicato sui provini secondo le procedure standard previste dalle normative UNI (norma UNI 6132).

### 3. RESISTENZA CARATTERISTICA A COMPRESSIONE

Il controllo delle prestazioni di un calcestruzzo si effettua misurando la resistenza a compressione di un certo numero di provini (cubici o cilindrici) confezionati nelle fasi di getto delle strutture. È noto che, quanto più numerosi saranno i prelievi e quindi i campioni, tanto più qualificato sarà lo studio statistico di tali misure [(06), (07) e (08)].

Vi è da precisare che le condizioni di stagionatura controllate dei provini consentono di ottenere una migliore garanzia del livello di qualità del materiale rispetto a quanto accade per il materiale in opera, il quale viene ad essere interessato da una serie di fattori esterni che possono influenzare le sue caratteristiche, tant'è che di tali fattori si tiene conto in sede di misura della sicurezza mediante l'impiego di opportuni coefficienti.

L'esigenza di uno studio statistico nasce da diverse considerazioni (si veda sempre (06), (07) e (08)). La prima è che la crisi di un elemento strutturale è legata ai valori minori delle prestazioni strutturali del materiale, e quindi occorre riferirsi prudenzialmente a valori "minoranti" delle sue caratteristiche (in particolare la sua resistenza), estratti dalle relative statistiche.

Peraltro, si deve considerare che, facendo riferimento al minimo dei valori di resistenza del materiale, ciò risulterebbe troppo oneroso e comunque non giustificato, in quanto i fattori esterni che possono ridurre il livello di resistenza del materiale sono eventi aleatori e quindi non è proprio razionale riferirsi al minimo di resistenza.

Pertanto, come è ben noto, si fa riferimento non al minimo valore della resistenza (per il calcestruzzo a compressione), ma ad un valore che si dice resistenza

caratteristica, il quale ha la probabilità  $5 \cdot 10^{-2}$  di essere minorato in riferimento ad un modello di statistica che interpreti l'istogramma delle frequenze relative della popolazione di misure della resistenza a compressione eseguite sui provini.

Un modello che interpreta la popolazione statistica delle misure di resistenza a compressione è la statistica di Gauss, detta anche normale. In Fig. 1 è mostrato il significato di valore caratteristico per una variabile aleatoria (v.a.)  $X$ , quando l'istogramma delle misure è modellato con la densità di probabilità gaussiana.

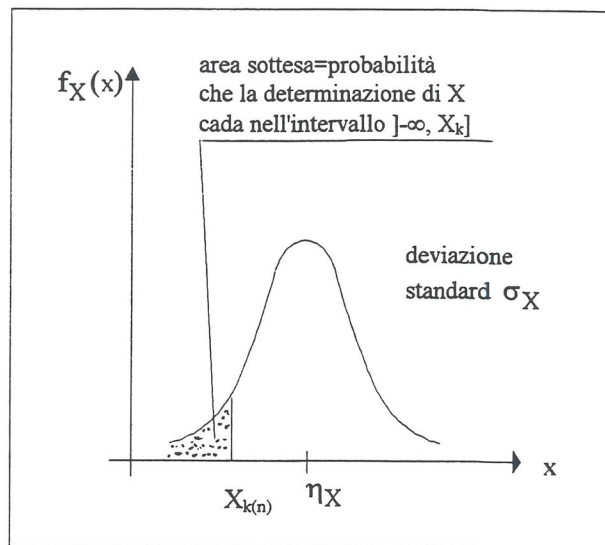


Figura 1. Funzione densità di probabilità di Gauss

Il valore caratteristico si ottiene così arretrando dal valor medio  $\eta_X$ , di  $k$  volte la deviazione standard  $\sigma_X$ , ossia:

$$X_{k(n)} = \eta_X - k_n \cdot \sigma_X = \eta_X \cdot (1 - k_n \cdot \sigma_X / \eta_X),$$

che può anche scriversi:

$$X_{k(n)} = \eta_X \cdot (1 - k_n \cdot \delta_X),$$

dove il parametro  $\delta_X$  costituisce il coefficiente di variazione, ed ovviamente il valore caratteristico  $X_{k(n)}$  è funzione del numero  $n$  di prove eseguite.

Stime imparziali del medio  $\eta_X$  e della deviazione standard  $\sigma_X$  sono le seguenti:

$$m_X = \sum x_i / n,$$

$$s_X = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_X)^2}{n - 1}},$$

cui corrisponde la stima del coefficiente di variazione  $\delta_X$  con l'espressione:

$$V_X = s_X / m_X.$$

Per il calcestruzzo a compressione, con  $n=12$  prove, risulta per  $k_{(n)}$  il valore di circa 1,71, in conformità con le indicazioni fornite da (08).

È evidente che quanto più piccola è la deviazione standard, tanto più il valore caratteristico sarà prossimo al valore medio e quindi il materiale offrirà prestazioni più garantite, mentre un materiale che presenti un valore, di resistenza media, più elevato di un altro, non è detto che sia di qualità superiore.

Infatti, se consideriamo le statistiche delle due variabili aleatorie  $X_1$  e  $X_2$  rappresentate in Fig. 2, aventi due diversi valori di medi e di deviazioni standard, precisamente  $\eta_{X_1} > \eta_{X_2}$  e  $\sigma_{X_1} > \sigma_{X_2}$ , può accadere che poi sia  $X_{1k} < X_{2k}$ .

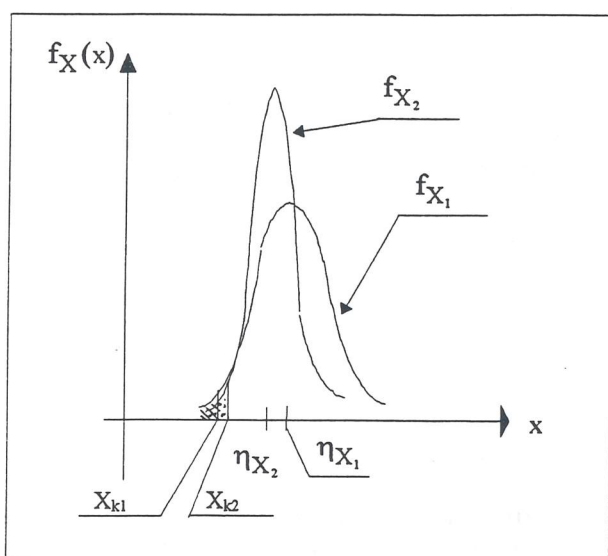


Figura 2. Confronto di statistiche diverse

In tal caso, quindi, il materiale 1 pur presentando un valore medio di resistenza a compressione superiore al materiale 2 (ossia con  $\eta_{X_1} > \eta_{X_2}$ ) non assicura (essendo poco garantito, ossia con  $\sigma_{X_1} > \sigma_{X_2}$ ) un livello di qualità superiore al materiale 2.

#### 4. RESISTENZA CARATTERISTICA DI CALCESTRUZZI AD ALTISSIMA RESISTENZA IN RELAZIONE AL CONTENUTO DI FIBRE.

Di seguito (Tab. 1) vengono riportati i valori caratteristici, i valori medi, le relative deviazioni standard e i coefficienti di variazione di una serie di misure eseguiti su provini cubici di diverse dimensioni e differenti contenuti in volume di fibre.

In particolare, nelle Figg. 3, 4, e 5 sono riportati gli andamenti della resistenza media e delle relative resi-

stenze caratteristiche in funzione del contenuto di fibre per cubi di lato 100, 70 e 50 mm, secondo i dati della Tab. I.

I risultati ottenuti considerano per ogni contenuto percentuale di fibre e per ogni dimensione dei provini una serie di 12 provini; essi mostrano che in generale non si hanno effetti dimensionali per le dimensioni dei provini considerate.

Inoltre, si hanno maggiori dispersioni nei risultati delle prove eseguite su provini senza fibre, a differenza di ciò che accade per i provini fibrorinforzati che evidenziano risultati con dispersioni molto contenute.

lato	$R_{cm}$	$s$	$R_{ck}$	V
100 mm	(MPa)	(MPa)	(MPa)	
0%	138,71	11,47	119,10	0,083
2%	156,42	3,36	150,68	0,021
4%	169,24	4,68	161,23	0,028
lato	$R_{cm}$	$s$	$R_{ck}$	V
70 mm	(MPa)	(MPa)	(MPa)	
0%	142,73	16,89	113,84	0,118
2%	160,52	4,67	152,54	0,029
4%	165,44	5,56	155,94	0,034
lato	$R_{cm}$	$s$	$R_{ck}$	V
50 mm	(MPa)	(MPa)	(MPa)	
0%	133,17	9,11	117,59	0,068
2%	150,45	4,98	141,94	0,033
4%	163,36	3,67	157,09	0,022

Tabella I. Resistenze medie e caratteristiche in provini diversi per dimensioni e contenuto di fibre in volume

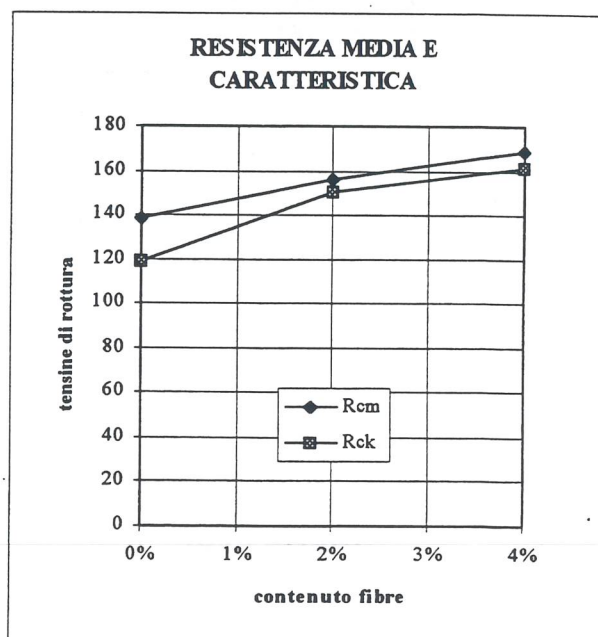


Figura 3. Tensione di rottura a compressione, media e caratteristica (cubi lato 100 mm)

Più precisamente, un maggiore quantitativo di fibre (4%) può determinare un aumento della dispersione (ad es. ciò si verifica nei risultati ottenuti per i provini di lato 100 mm), il quale può vanificare il pur lieve incremento di resistenza media che si ottiene all'aumentare del contenuto di fibre (si ricordi fig. 2) impiegato nel confezionamento del materiale.

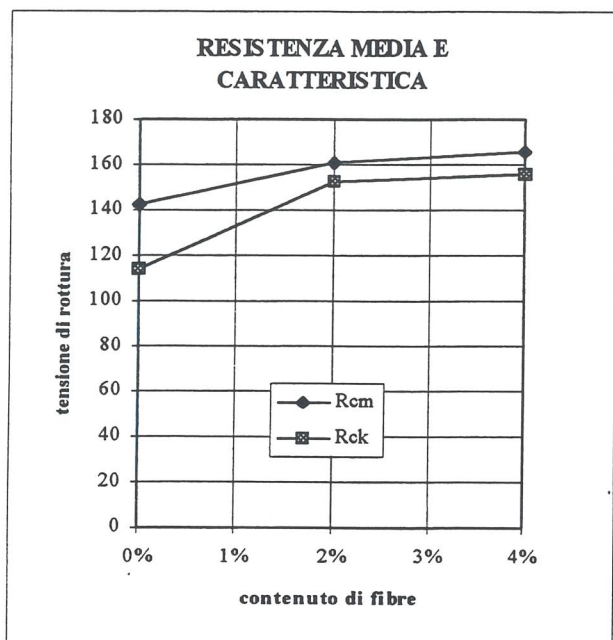


Figura 4. Tensione di rottura a compressione, media e caratteristica (cubi lato 70 mm)

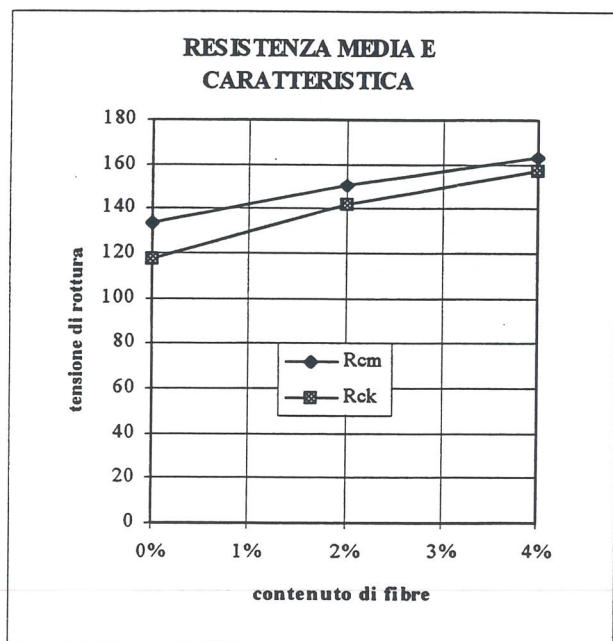


Figura 5. Tensione di rottura a compressione, media e caratteristica (cubi lato 50 mm)

Quanto detto per la resistenza caratteristica a com-

pressione, si può pensare di estenderlo a qualsiasi altra caratteristica del materiale.

Pertanto, anche per una qualsiasi altra caratteristica, è plausibile la possibilità che al miglioramento del suo valore medio non sempre corrisponda un miglioramento del suo valore caratteristico.

Gli incrementi di resistenza col contenuto di fibre sono anche evidenziati dai dati riportati nella Tab. I. I risultati denotano variazioni significative fra materiali senza e con fibre; l'aumento del contenuto di fibre dal 2% al 4% non determina apparentemente alcun incremento significativo della resistenza.

Come si è detto, i materiali fibrorinforzati evidenziano un valore inferiore della deviazione standard (a volte dimezzata). Questo è probabilmente dovuto alla maggiore duttilità del materiale con fibre di rinforzo, con migliori distribuzioni tensionali nel provino a rottura. In effetti in molti campioni non fibrorinforzati sono state rilevate importanti scheggiature (con conseguente riduzione della sezione resistente), prima di raggiungere il pieno carico.

La maggiore deviazione standard è da attribuirsi pertanto ad una maggiore influenza delle lievi imperfezioni geometriche sui risultati delle prove.

## 5. DISCUSSIONE

I risultati sperimentali ottenuti hanno consentito un'interpretazione secondo il modello statistico gaussiano.

Nelle Figg. 6, 7 e 8, sono riportate le funzioni di densità relative al caso di provini di lato 50 mm, mentre le Figg. 9, 10 e 11 sono relative ai provini di lato 100 mm.

L'andamento di tipo normale della densità, consente di ottenere, sia una efficace evidenziazione dell'influenza del diverso contenuto di fibre sulla qualità delle prestazioni del materiale, sia un semplice modello statistico per valutare i valori caratteristici della resistenza a rottura del materiale.

La presenza di fibre più che determinare un incremento di resistenza a rottura del materiale, legato all'effetto di confinamento, determina un miglioramento delle sue prestazioni nel senso di una più garantita qualità (deviazione standard ridotta a valori propri di materiali confezionati con processi controllati e garantiti). Si può ritenere che la presenza di fibre determini un controllo del processo di rottura tale da attenuare il carattere di fragilità proprio dei materiali, e che questo consenta ai provini confezionati con fibre di conservare una sostanziale integrità del materiale fino al raggiungimento del completo rilassamento del carico.

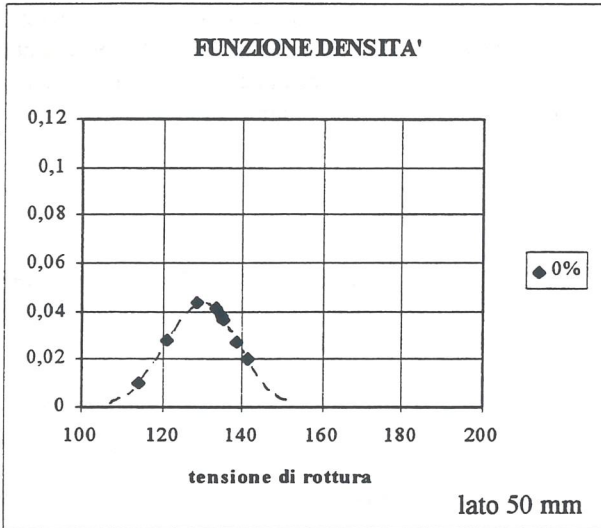


Figura 6. Densità di probabilità di tipo normale

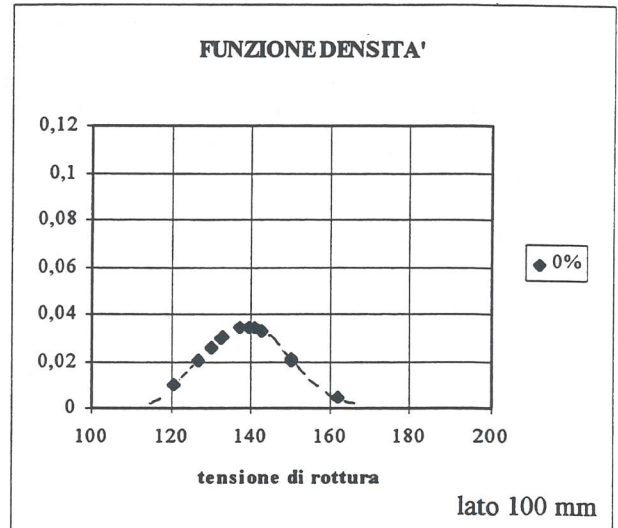


Figura 9. Densità di probabilità di tipo normale

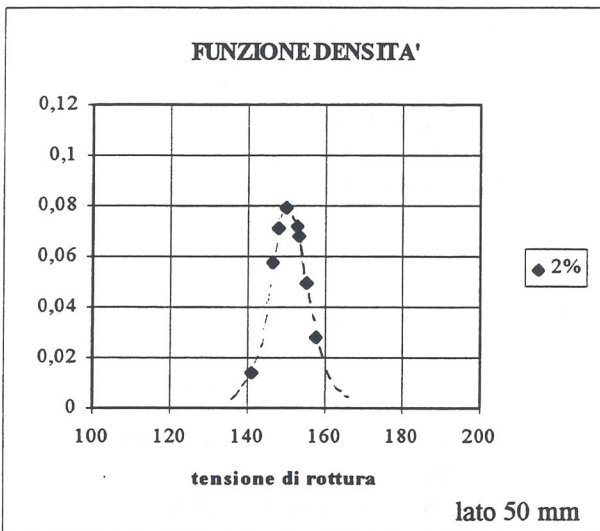


Figura 7. Densità di probabilità di tipo normale

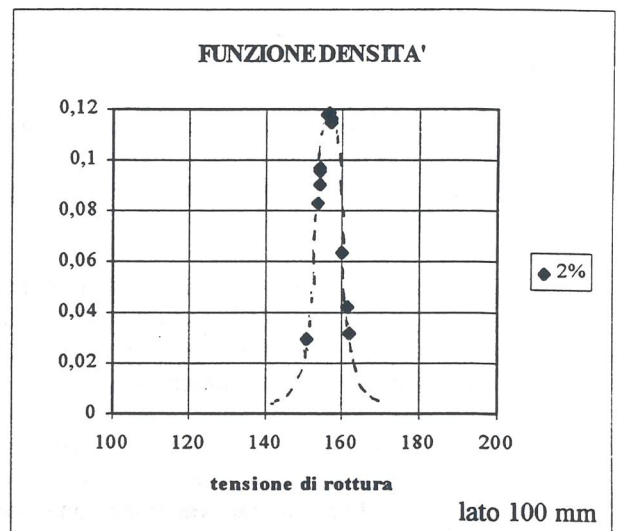


Figura 10. Densità di probabilità di tipo normale

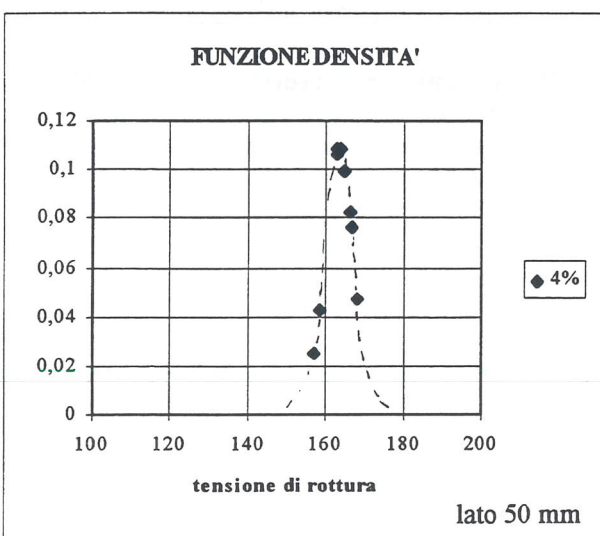


Figura 8. Densità di probabilità di tipo normale

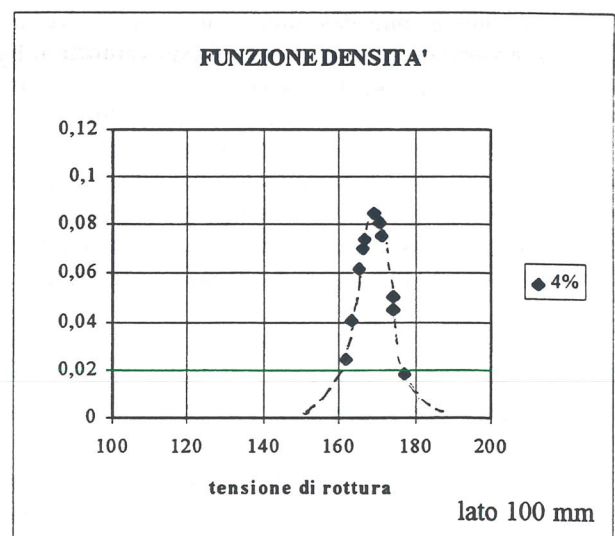


Figura 11. Densità di probabilità di tipo normale

Nel caso di provini confezionati senza fibre, invece, non vi è nessun componente che espliciti in modo significativo tale controllo del processo di rottura, capace di attenuare il carattere di fragilità del materiale: i provini durante la prova a compressione, mostravano, già per carichi dell'ordine del 60÷70% di quello a rottura, un graduale distacco di schegge di materiale, che in alcuni casi determinava una riduzione della sezione iniziale anche del 20% (la tensione di rottura è convenzionalmente riferita alla sezione iniziale del provino).

Inoltre, pur nei limiti della sperimentazione svolta, si potrebbe segnalare che al di sopra di un determinato quantitativo di fibre il materiale presenta una dispersione che sembra aumentare (cfr. Figg. 10 e 11).

## 6. CONCLUSIONI

I risultati ottenuti consentono di concludere quanto segue:

1. la presenza di fibre più che determinare un incremento di resistenza a rottura del materiale, legato all'effetto di confinamento, determina un miglioramento delle sue prestazioni nel senso di una più garantita qualità;
2. i valori della deviazione standard riscontrati nei risultati di prove su provini confezionati con fibre sono inferiori al valore di 5 MPa, valore imposto dalla normativa tedesca DIN (09) come minimo per la determinazione dei valori caratteristici;
3. è stato riscontrato che i provini confezionati con fibre (2% e 4% in volume), hanno un valore della deviazione standard minore rispetto ai provini confezionati senza fibre; ma tale variazione non risulta essere inversamente proporzionale all'aumentare del contenuto di fibre;
4. la presenza di un maggior quantitativo di fibre (4% in volume) può determinare un aumento della dispersione dei risultati e questo può vanificare il pur lieve incremento di resistenza media che si determina con l'aumentare del contenuto di fibre.

Il numero di provini utilizzati nella sperimentazione e i limitati dati sperimentali disponibili in letteratura non consentono di trarre valutazioni statisticamente definitive per questi materiali ad alta resistenza. Pertanto, è previsto un più ampio e dettagliato programma di prove.

tecnico di Milano e la sua Scuola di Specializzazione "Fl. Pesenti". Tale programma riguarda lo sviluppo e la caratterizzazione meccanica di materiali a base cementizia ad altissima resistenza per opere civili.

## BIBLIOGRAFIA

- (01) **P. K. METHA, P.J.M. MONTEIRO:** "Concrete: structure, properties and materials", Prentice-Hall 2nd ed., New Jersey, 1993.
- (02) **A.M. NEVILLE:** "Properties of Concrete", 3rd Edn, Longman Harlow, UK, 1981, pp 527-565.
- (03) **P. A. GUTIERREZ:** "The modulus of elasticity of high performance concrete", *Materials and Structures*, 1995, 28, pp 559-568.
- (04) **ENV 206:** Norma Europea provvisoria - versione italiana: UNI 9858, febbraio 1989: "Calcestruzzo: prestazioni, produzione, getto e criteri di conformità".
- (05) **H. H. BACHE:** "Densified Cement Ultra-fine Particle Based Materials", 2nd Int. Conf. on Superplasticizer in Concrete, Ottawa, 1981, pp. 35.
- (06) **A. MIGLIACCI, F. MOLA:** "Progetto agli stati limite delle strutture in C. A.", Seconda edizione, Masson S.p.A - Milano.
- (07) **F. M. BARTLET, G. MACGREGOR:** "Statistical Analysis of the Compressive Strength of Concrete in Structures", *ACI Material Journal*, V. 93, No. 2, March-April 1996.
- (08) **EC1:** "Basis of Design and Actions on Structures", CEN/TC250, 15 March 1993.
- (09) **Commissione Tedesca per il Calcestruzzo Armato:** "Direttiva DAfStb per il calcestruzzo ad alta resistenza- Integrazione alla norma DIN 1045/07.88 per le classi di resistenza da B65 a B115", Berlino, agosto 1995.

## RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è parte di un programma di ricerca che il CTG (Centro Tecnico di Gruppo - Italcementi - Ciments Français) sta sviluppando in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Poli-