

**CORRELAZIONE FRA IL MODULO ELASTICO E LA RESISTENZA  
A COMPRESSIONE DI CALCESTRUZZI AD ALTA RESISTENZA**

**Maurizio ACITO**  
Ingegnere, Milano

**Gian Luca GUERRINI**  
CTG- ITALCEMENTI GROUP, Direzione Laboratori, Bergamo

## CORRELAZIONE FRA IL MODULO ELASTICO E LA RESISTENZA A COMPRESSIONE DI CALCESTRUZZI AD ALTA RESISTENZA

**Maurizio ACITO**

Diplomato alla Scuola di Specializzazione in  
C. A. "F.lli Pesenti" - Politecnico Milano

**Gian Luca GUERRINI**

CTG-Italcementi Group-Direzione laboratori Bergamo

### SOMMARIO

In questo lavoro si discute del problema della valutazione del modulo elastico di calcestruzzi ad alta (HSC) ed altissima resistenza (additivati (FRC) e non da fibre). Vengono analizzate alcune espressioni già proposte, in letteratura e disposizioni di normative nazionali ed internazionali, per la correlazione tra la resistenza a compressione ed il modulo elastico tangente all'origine. Successivamente, si considerano i risultati ottenuti in due serie di prove sperimentali a compressione, eseguite su campioni di forma cilindrica (rapporto altezza/diametro=2) realizzati con calcestruzzo ad alta resistenza, anche additivato con fibre, i quali, preventivamente, sono stati interessati da una storia di carico e scarico (fino a circa il 30% del carico di rottura) che ha permesso di determinare il tratto iniziale della legge  $\sigma$ - $\epsilon$  dalla quale si è potuto desumere il modulo elastico. Per essi, inoltre, viene esaminata la correlazione tra la resistenza a compressione misurata e la stima del modulo elastico, proponendo un confronto con le espressioni proposte in letteratura e dalle disposizioni delle normative analizzate.

### SUMMARY

*In this paper we discuss the problem of the evaluation of the modulus of elasticity for high and ultra high strength concrete (with and without fibers). Different proposed equations are analyzed, given by the literature and by various national and international codes, for the correlation between the compressive strength and the tangent elastic modulus at the origin, and a comparison between the various proposals is also suggested. The second part of the paper describes the results obtained by compressive tests, made on cylindrical specimens (height/diameter=2) of high strength concrete, also fiber reinforced, which have been previously interested by a load-unload history ( to the 30 % of the failure load ) which permitted to determine the beginning of the ascending branch of the stress-strain curve and having, from this, the elastic modulus. Furthermore, besides it is examined the correlation between the measured compressive strength and the estimation of the modulus of elasticity, showing a comparison with the expressions from the literature and from the national and international codes analyzed.*

### 1. PREMESSA

In ingegneria civile, spesso, sia per ragioni di funzionalità (servizio, SLS) che di sicurezza ultima (ULS), risulta, di fondamentale importanza la determinazione del modulo elastico del materiale impiegato nella realizzazione di elementi strutturali portanti. Come è noto,

il modulo elastico dei calcestruzzi può essere determinato sia con riferimento alla tangente all'origine della curva tensione-deformazione, costruita con prove di tipo monoassiale (in questo caso si parla di modulo dinamico o tangente), sia con riferimento alla secante in un punto della stessa curva (in tal caso si parla di modulo statico o secante).

I risultati sperimentali reperibili in letteratura e le disposizioni di tutte le normative vigenti, riferiti sia ai calcestruzzi ordinari che a quelli ad alta resistenza (cfr. ad es. [01], [02], [03], [04], [05], [06]) indicano chiaramente che il modulo elastico  $E_c$  è correlato alla resistenza a compressione del materiale. Le correlazioni proposte, determinate attraverso delle campagne di prove, hanno, però, notevole rispondenza solo per il mix design impiegato e pertanto assumono valore puramente indicativo se utilizzate per mix design differenti.

Il modulo elastico dei calcestruzzi, infatti, per una data stagionatura, dipende dal modulo elastico della pasta di cemento e degli aggregati, oltre che dalle proporzioni dei suoi componenti [07].

Il modulo elastico della pasta di cemento, essenzialmente, dipende dalla porosità e quindi un ruolo fondamentale è giocato dal rapporto a/c [08], nonché, dall'aggiunta di additivi di natura fisica (ad es. microsilice, in [08], però, viene evidenziato la sostanziale indipendenza dalla natura di questi tipi di additivi) dall'aggiunta di additivi di natura chimica, i quali conducono ad una riduzione del rapporto a/c. La correlazione negativa tra il rapporto a/c e la resistenza a compressione nonché la correlazione nello stesso senso tra il rapporto a/c ed il modulo elastico (a pari mix), spiegano perché tutte le proposte per la valutazione del modulo elastico dei calcestruzzi si riferiscono ad espressioni che lo legano alla resistenza a compressione, la quale è la caratteristica di gran lunga più semplice da determinare per i calcestruzzi ed a cui si fanno risalire le altre, attraverso correlazioni.

Le proporzioni tra quantità di aggregato e quantità di pasta, per ottimizzare il mix design, nei riguardi della resistenza a compressione, comporta un rapporto volumetrico tra aggregati e pasta di cemento compreso tra il 65% e l'85% [07] (normalmente oscilla nell'intervallo tra il 70 e il 75%); per quanto detto, considerare l'effetto di tale rapporto sul valore del modulo elastico del calcestruzzo è poco significativo.

L'influenza del modulo elastico degli aggregati risulta, invece, significativa per la determinazione del modulo elastico del calcestruzzo, senza però essere tale per la resistenza a compressione. In [07], si mostra come calcestruzzi con la stessa resistenza a compressione, confezionati con aggregati diversi, presentino moduli elastici notevolmente diversi.

Le risultanze sperimentali sono relative a campioni confezionati con aggregati della stessa natura. Notevolmente più complesso risulta valutare l'influenza sul modulo elastico del calcestruzzo quando l'aggregato risulta composto da materiali di diversa natura, aventi,

quindi, moduli elastici diversi. In realtà il confezionamento degli aggregati avviene impiegando materiali le cui caratteristiche sono molto simili. Pertanto, uno studio in merito non ha sufficiente interesse pratico.

La necessità di determinare proposte di correlazione tra modulo elastico e resistenza a compressione per i calcestruzzi ad alta ed altissima resistenza, nasce dal fatto che nella maggior parte delle normative sono considerati calcestruzzi ordinari (fino a circa 50÷60 MPa) e pertanto le correlazioni proposte non possono estendersi oltre tale limite. Il comportamento meccanico dei materiali ad alta ed altissima resistenza risulta, infatti, notevolmente differente da quello dei calcestruzzi ordinari (cfr. ad es. [09], [10]).

Un calcestruzzo ordinario, tipicamente, è un materiale non omogeneo, che evidenzia notevoli differenze di proprietà elastiche fra aggregati e pasta di cemento. È caratterizzato, inoltre, da una scarsa e non completa adesione pasta-aggregato. Le fratture, in elementi realizzati con questi materiali, avvengono sempre lungo superfici irregolari che interessano in genere volumi rilevanti di materiale. Comunemente, gli aggregati non sono interessati da fratture e si osserva una enucleazione di tali aggregati dalla matrice. Da un punto di vista macroscopico questo si traduce in una apprezzabile "duttilità" del materiale (Fig. 1 curva a).

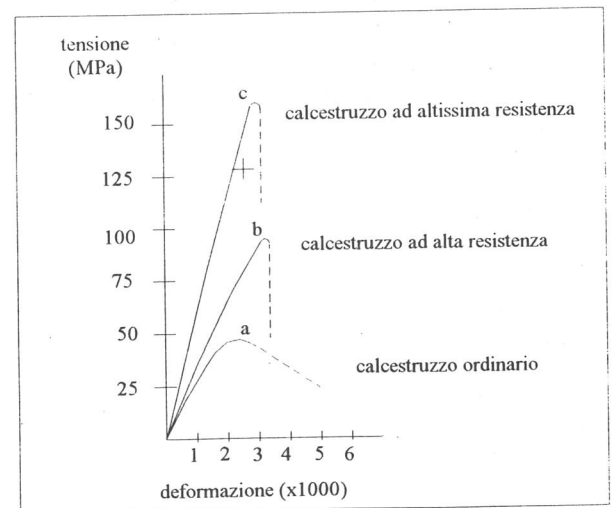


Fig. 1. Curve qualitative sforzo-deformazione di calcestruzzi ordinari ad alta ed altissima resistenza

Il comportamento dei materiali ad alta ed altissima resistenza è decisamente più omogeneo.

Innanzitutto, è ridotta la dimensione massima degli aggregati, cosicché viene a ridursi la probabilità di avere difetti negli aggregati stessi.

Scegliendo, di converso, aggregati di elevata qualità e di forma opportuna, la resistenza di questi ultimi e

la resistenza della pasta di cemento sono confrontabili e come conseguenza si ha un'ottima adesione sull'interfaccia. L'effetto che immediatamente si osserva è quello che la distribuzione interna delle tensioni risulta più omogenea rispetto ad un calcestruzzo ordinario, ossia con minori concentrazioni di tensioni e più limitate fessurazioni. Le fratture che si formano in elementi realizzati con questi materiali sono assai più regolari ed interessano sia la pasta che gli aggregati, senza una enucleazione di questi ultimi. Il comportamento macroscopico di questi materiali risulta assai meno duttile, con rotture decisamente più esplosive, anche con disintegrazione dei provini. Il comportamento post-critico è difficilmente rilevabile in quanto si evidenziano drastici riduzioni di capacità portante (Fig. 1 curva c).

Gli andamenti qualitativi di figura 1 evidenziano un tratto lineare (modulo costante), la cui pendenza ed estensione cresce all'aumentare della resistenza del materiale, un successivo andamento softening che denota una riduzione del modulo in relazione allo sforzo.

Gli andamenti qualitativi riportati, però, per quanto detto, non possono essere considerati di validità generale, soprattutto con riferimento alla pendenza del tratto lineare.

Infatti, come già detto, nella determinazione del modulo elastico entrano in gioco diversi fattori tra i quali un ruolo importante è svolto dagli aggregati [07].

L'importanza degli aggregati è riconosciuta sia a livello di normativa (in A.C.I. 363-92R [03] è chiaramente detto che la differenza fra il valore previsto dalla proposta di correlazione e il valore misurato per un dato materiale è fortemente legato alla natura, forma e pezzatura degli aggregati), sia a livello di proposte di letteratura (ad es. [08]).

Nel seguito vengono riportate alcune correlazioni tra resistenza a compressione e modulo elastico di calcestruzzi ad alta resistenza (additivati e non da fibre) proposte in letteratura e da alcune normative nazionali e internazionali.

## 2. ALCUNE PROPOSTE DI CORRELAZIONE TRA $E_c$ E LA RESISTENZA A COMPRESSIONE

### 2.1 Modelli proposti da normative

MC 90 C.E.B. F.I.P. [01]

La correlazione proposta in [01] per la valutazione del modulo elastico a 28 giorni di stagionatura, valida per calcestruzzi di classe non superiore a C100 (MPa), è la seguente:

$$E_{ci} = E_{c0} \left[ (f_{ck} + \Delta f) / f_{cm0} \right]^{0.3},$$

dove,

$E_{ci}$  = modulo ai 28 giorni,

$f_{ck}$  = resistenza cilindrica,

$$\begin{aligned} \Delta f &= 8 \text{ MPa,} \\ f_{cm0} &= 10 \text{ MPa,} \\ E_{c0} &= 22 \text{ GPa,} \end{aligned}$$

La correlazione è riferita alla resistenza cilindrica caratteristica ( $f_{ck}$ ). Per calcestruzzi con una resistenza superiore a 50 MPa il C.E.B. presenta una formula alternativa, sempre con riferimento alla resistenza cilindrica caratteristica, a quella precedente, che ha l'espressione seguente:

$$E_{ci} = E_{c0} \left[ (f_{ck} / f_{cm0}) \right]^{0.3}$$

A.C.I. 363 [03]

L'espressione della correlazione proposta in [03] per la valutazione del modulo elastico a 28 giorni di stagionatura è valida per calcestruzzi di resistenza a compressione media fino a 83 MPa. La formula di correlazione proposta dall'American Concrete Institute prevede:

$$E_c = 3320 \sqrt{f'_c} + 6900 \text{ MPa.}$$

dove,

$f'_c$  = resistenza media cilindrica a compressione.

NORMATIVA NORVEGESE NS 3473-1992  
(disposizione riportata [06])

L'espressione della correlazione proposta, riportata in [06], è valida per calcestruzzi con resistenza massima pari a 94 MPa. L'espressione della correlazione è la seguente:

$$E_c = 9500 (f_{cc})^{0.3} (\rho / 2400)^{1.5}$$

dove è:

$f_{cc}$  = resistenza cilindrica del calcestruzzo

$\rho$  = densità del calcestruzzo (in generale 2400 kg/mc).

L'espressione risulta più complessa perché prescritta anche per la valutazione del modulo elastico di calcestruzzi di particolare leggerezza (LWA).

NORMATIVA OLANDESE [06]

La correlazione proposta, riportata in [06], è valida per calcestruzzi con resistenza massima cubica fino a 105 MPa, è la seguente:

$$E_c = 35900 + 40 f_{cck}$$

dove è:

$f_{cck}$  = resistenza cubica del calcestruzzo a 28 gg.

In questo caso la correlazione è con la resistenza cubica a compressione valutata su cubi di lato 150 mm.

NORMATIVA ITALIANA [11]

La normativa italiana [11] prevede l'utilizzo di calcestruzzi con resistenza caratteristica cubica ( $R_{ck}$ ) massima di 55 MPa. Tuttavia c'è la possibilità di utilizzare, per calcestruzzi di resistenza cubica caratteristica a compressione massima di 75 MPa, le stesse correlazioni, previa approvazione del Consiglio dei Lavori

Pubblici. In alternativa si possono utilizzare, per  $f_{ck}$  non superiori a 80 MPa, le correlazioni del C.E.B..

Le correlazioni presenti in normativa [11] per il calcolo del modulo elastico, valide fino a  $R_{ck}$  di 55 MPa, sono le seguenti:

$$E_c = 5700\sqrt{R_{ck}} \text{ N/mm}^2, \quad (\text{UNI 6556-1976})$$

che per calcestruzzi maturati a vapore diventa:

$$E_c = 5100\sqrt{R_{ck}} \text{ N/mm}^2.$$

In alternativa alle proposte di correlazioni vi sono normative che assegnano direttamente un valore al modulo elastico, che può essere diverso oppure lo stesso per differenti classi di resistenze dei vari calcestruzzi.

Esempi di norme che adottano tale approccio sono la normativa tedesca (estensione DIN 1045), la normativa finnica, la normativa svedese (riportate in [06]), ed infine l'Eurocodice 2. In esse si specifica il valore del modulo elastico per le diverse classi di resistenza del calcestruzzo.

DIN 1045 [12]

In tabella 1 sono riportati i valori del modulo elastico in relazione alla classe di resistenza proposta in [12].

classi resistenza	B 65	B 75	B 85	B 95	B 105	B 115
$E_{cm}$ (GPa)	40.5	42	43	44	44.5	45

Tabella 1 (resistenza caratteristica cubica)

EC-2 [04]

In tabella 2 sono riportati i valori del modulo elastico relativi alla classe di resistenza proposta in [04].

classi resistenza	C12 C15	C16 C20	C20 C25	C25 C30	C30 C35	C35 C40	C40 C50	C45 C55	C50 C60
$E_{cm}$ (GPa)	26	27,5	29	30,5	32	33,5	35	36	37

Tabella 2 (resistenza caratteristica cilindrica)

Le correlazioni esaminate sono sia con riferimento alla resistenza cubica che alla resistenza cilindrica (sia media che caratteristica).

Questo diverso riferimento introduce un ulteriore elemento di aleatorietà data la difficoltà di stimare il valore del rapporto di correlazione tra la resistenza cilindrica e la resistenza cubica ( $k_{cc}$ ).

In molti paesi, fra i quali gli Stati Uniti e la Francia, la resistenza di riferimento è quella cilindrica mentre in altri paesi, come, ad esempio, l'Italia, la Germania ed il Belgio, è tipico utilizzare provini cubici. Per i calce-

struzzi ordinari il valore del rapporto  $k_{cc}$  è compreso nel range fra 0.8 e 0.83 ed è determinato in base alla classe di resistenza del calcestruzzo stesso. Quando, invece, si utilizzano calcestruzzi con resistenze superiori a 65 MPa è opportuno aumentare il rapporto  $k_{cc}$  fino a 0.85 ed oltre. Esperienze condotte su materiali con resistenza compresa fra 60 e 130 MPa ([14], [15] e [16]) hanno evidenziato valori di  $k_{cc}$  decisamente più elevati. In [13] i valori trovati sono compresi fra 0.90 e 0.99.

In figura 2 sono riportati gli andamenti proposti dalle normative esaminate.

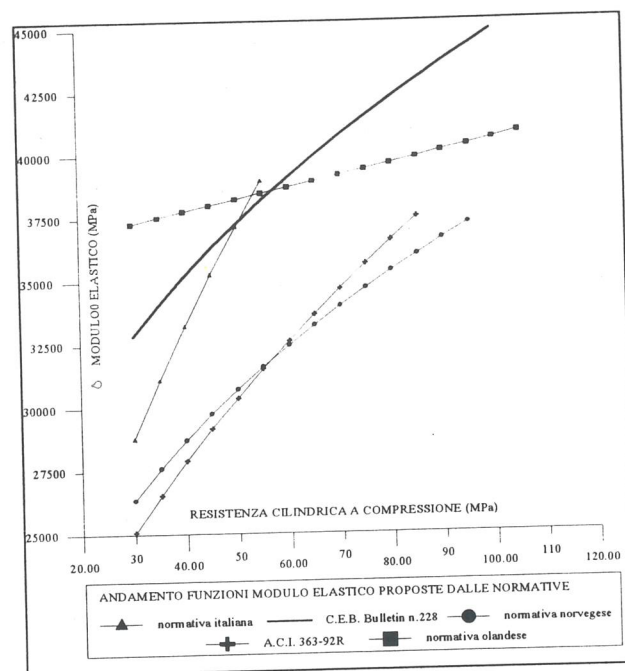


Fig. 2 Andamenti delle correlazioni esaminate

Dal grafico di figura 2 si evince una notevole differenza tra le diverse proposte per il calcolo del modulo elastico.

Quando si considerano resistenze maggiori di 55 MPa, il modello C.E.B. fornisce i valori maggiori, mentre, la normativa norvegese quelli minori.

Si noti che i valori che si ottengono con l'espressione della normativa norvegese sono di una quantità pari circa al 15% inferiori a quelli calcolati con l'estensione del MC-90 C.E.B. [01].

### 2.3 Modelli in letteratura per il modulo elastico di HSC

In [07], viene presentato un esteso studio sperimentale con riferimento a provini di calcestruzzi confezio-

nati con aggregati della stessa natura. Inizialmente, riprendendo i modelli di calcolo proposti in alcune normative, vengono presentate tre espressioni differenti per il calcolo del modulo del calcestruzzo. In particolare, le curve sono di proporzionalità alla radice cubica della resistenza cilindrica (cfr. ad esempio estensione del M.C.90 del C.E.B.), di proporzionalità alla radice quadrata (cfr. ad esempio A.C.I. 363, codice spagnolo EH-91), di proporzionalità lineare (cfr. ad esempio codice BS 8110 britannico).

Successivamente, in [07], imposto ai vari modelli proposti il passaggio per l'origine, si è ottenuto che solo l'espressione di proporzionalità con la radice cubica della resistenza cilindrica non determina una riduzione del coefficiente di correlazione ( $r$ ). Le espressioni ottenute in [07] sono, alla luce di tale condizione:

- nel caso di linea retta non è possibile il passaggio per l'origine;
- $E_c = 4100 \sqrt{f_{cm}}$  ( $r=0.867$ ),
- $E_c = 8330 \sqrt[3]{f_{cm}}$  ( $r=0.938$ ).

Per tenere poi in conto l'influenza del modulo elastico dell'aggregato sul modulo elastico del calcestruzzo, in [07] viene proposta la seguente espressione del modulo a 28 gg. di stagionatura:

$$E_{ci} = 0.85 \alpha_\beta \left[ (f_{ck} + \Delta f) / f_{cm0} \right]^{0.3} \cdot \alpha_\beta,$$

dove,

$$\alpha_e = 2.15 \cdot 10^4 \text{ MPa};$$

$\alpha_\beta$  è un coefficiente che congloba l'influenza della natura degli aggregati e del loro modulo elastico.

In [07] si osserva anche che il valore della regressione migliora notevolmente se si utilizza la resistenza media e non quella caratteristica e ci si limita a calcestruzzi di resistenza cilindrica caratteristica non superiore a 80 MPa.

Qualora il coefficiente  $\alpha_\beta$  non fosse disponibile in letteratura, in [07] è fornita l'espressione della correlazione fra modulo di elasticità dell'aggregato ed il coefficiente stesso. L'espressione indicata è la seguente:

$$\alpha_\beta = 0.1485 \sqrt{E_a} \quad (r=0.9), \quad (*)$$

dove,

$E_a$  il modulo elastico degli aggregati.

L'espressione concorda sufficientemente per aggregati tipo basalti ( $\alpha_\beta=1.2$ ), calcari densi ( $\alpha_\beta=1.2$ ), quarziti ( $\alpha_\beta=1$ ), calcari ( $\alpha_\beta=0.9$ ) ed arenarie ( $\alpha_\beta=0.7$ ).

La resistenza minima a compressione necessaria negli aggregati usati per produrre HSC ed FRC dev'essere almeno pari a 100 MPa.

Il valore massimo e minimo del modulo  $E_c$  possono essere calcolati introducendo il limite inferiore e superiore di resistenza di una famiglia di aggregati all'interno della formula per trovare  $\alpha_\beta$ .

I valori di  $\alpha_\beta$  scelti sono ragionevolmente conservativi, in modo tale che il valore reale di  $E_c$  sarà maggiore del valore calcolato.

L'espressione della correlazione [07], in definitiva, è:

$$E_c = \alpha_\beta 8480 \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (**)$$

Un esempio lampante dell'importanza degli aggregati per il valore di  $E_c$  (cfr. [07]) di un calcestruzzo, prodotto con aggregato diabase e con aggregato arenario è che nel primo caso si ha un valore di 58000 MPa mentre nel secondo di soli 23000 MPa, ovviamente a parità di resistenza.

In [07] si è poi constatato che per gli aggregati normali le differenze trovate con la espressione di correlazione suggerita non eccedono il 30 %.

È chiaro che assumere  $\alpha_\beta=1$  nei progetti dove  $E_c$  non ha importanza rilevante non comporta gravi errori; al contrario, quando il controllo della deformabilità della struttura in esame è molto importante, un'attenzione particolare andrebbe rivolta alla selezione degli aggregati.

Quando poi, l'eccessiva deformabilità può condurre al raggiungimento degli ULS, diventa indispensabile una selezione dell'aggregato (ad es. anche con l'ausilio della correlazione proposta in [07], utilizzata con procedimento inverso). Vi è di più, in tali casi, sarebbe opportuno, fare riferimento a valori caratteristici del modulo elastico (specie se ottenuto da una correlazione con la resistenza a compressione media).

Per i problemi di controllo di deformabilità si può procedere come segue: attraverso la formula della freccia, fissato il limite di deformabilità, si valuta  $E_c$  e per la data resistenza, quindi il valore di  $\alpha_\beta$  dalla (\*\*), poi, attraverso la correlazione col modulo elastico dell'aggregato (\*), risulta univocamente determinato la famiglia di aggregati più idonei allo scopo.

### 2.3 Modelli per la valutazione del modulo elastico per calcestruzzi fibrorinforzati

I lavori svolti per la valutazione del modulo elastico del composito si fondano principalmente sul modello di Voight. Tale modello prevede che il modulo elastico del composito sia espresso come combinazione lineare

dei moduli della matrice e delle fibre aggiunte, pesati attraverso la loro percentuale in volume. Il modulo per tale modello è dato da (riportato in [17]):

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

dove,

$E_c$  = modulo elastico del calcestruzzo fibro-rinforzato,

$E_f$  = modulo elastico delle fibre,

$E_m$  = modulo elastico della matrice,

$V_f$  = volume percentuale delle fibre, dato dal rapporto volume fibre/volume totale

Le fibre, presenti all'interno della matrice, hanno chiaramente un'orientazione random, si dispongono, cioè, in modo totalmente casuale all'interno di essa. Per tenere conto di questo fatto il modello di calcolo, per il modulo elastico è stato modificato. La modifica consiste in un coefficiente  $\eta_0$  che tiene conto dell'orientazione random delle fibre. Il valore di tale coefficiente è dato dalla formula seguente:

$$\eta_0 = \frac{\iint \cos\theta \cos\rho \, d\theta \, d\rho}{\iint d\theta \, d\rho} = 0.405 \quad [18]$$

dove  $\theta$  e  $\rho$  sono gli angoli formati dalla singola fibra con il piano  $xy$  e l'asse  $y$ , rispettivamente.

Tale coefficiente è dato dal rapporto fra la somma di tutte le lunghezze delle fibre presenti proiettate lungo la direzione di sollecitazione e la somma delle lunghezze delle singole fibre.

Esiste anche un altro coefficiente che tiene conto dell'efficienza in lunghezza delle fibre stesse; infatti, una fibra può andare in crisi per sfilamento dalla matrice (perché la sua lunghezza è inferiore ad una data lunghezza critica) oppure per rottura della fibra stessa (caso in cui la lunghezza della fibra risulta essere superiore a quella critica).

Il modulo elastico, tenendo conto di questo accorgimento, va calcolato come di seguito, da [17]:

$$E_c = \eta_0 E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

dove i simboli presenti nella formula hanno lo stesso significato della formula precedente.

Modelli più complicati per il calcolo di  $E_c$ , ma che in questa sede non vengono considerati, sono i cosiddetti modelli trifase [19]. In breve, si tratta di un modello che descrive il calcestruzzo fibro-rinforzato, come un materiale trifase, costituito da tre componenti differenti fra loro: fibre, calcestruzzo ed il materiale che funge da zona di transizione fra la fibra e la matrice cementizia.

Un modello pseudo trifase, invece, considera sempre FRC costituito da tre materiali diversi ma il terzo stato, cioè la zona di transizione, è considerato a volume nullo.

La formulazione in [19] può essere utilizzata come valido strumento per l'ottimizzazione delle proprietà

elastiche dei cementi fibro-rinforzati e di composti a base ceramica.

### 3. MATERIALI E ATTREZZATURA SPERIMENTALE

#### 3.1 Materiali

I materiali utilizzati per questo studio sono del tipo proposto per la prima volta da H. Bache [20] e sono definiti comunemente DSP (Densified Systems containing homogeneously arranged ultrafine Particles).

Si tratta di malte ad altissima resistenza contenenti sabbia di quarzo e microsiline con eventuali microfibre di rinforzo in acciaio.

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>), di 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 nella Tabella 3.

rapp. microsiline/legante	0.20	0.20	0.20
rapporto 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 3 Mix design

Gli impasti sono stati preparati utilizzando un mescolatore planetario Hobart da 15 litri e caratterizzati allo stato fresco mediante la tavola a scosse ASTM.

I provini sono stati confezionati utilizzando stampi in acciaio e plexiglas e, successivamente, vibrati mediante un tavolo ad elevata frequenza (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).

Le dimensioni dei grani della microsiline sono di due ordini di grandezza inferiori a quelli del cemento.

Queste caratteristiche, da un punto di vista meccanico, risultano estremamente importanti, in quanto i grani di microsilice, occupando i vuoti fra le particelle di maggiore dimensione, consentono di ottenere una struttura del materiale molto compatta.

Inoltre, la microsilice, durante l'impasto, ha un effetto lubrificante e svolge un'ulteriore attività pozzolanica.

### 3.2 Attrezzatura sperimentale

Per le prove sperimentali di determinazione della resistenza a compressione è stata utilizzata una macchina di prova universale Controls da 3000 kN, applicando il carico sui provini, secondo le procedure standard previste dalla normativa UNI 6132.

Per le prove sperimentali di determinazione del modulo elastico è stata utilizzata una macchina di prova oleodinamica tipo Galdabini, mediante la quale si è applicato ai campioni una storia di carico e scarico (fino a circa il 30% del carico di rottura) che ha permesso di determinare il tratto iniziale della legge  $\sigma$ - $\epsilon$  dal quale si è potuto desumere il modulo elastico.

La misura della deformazione è stata ottenuta come media di tre misure eseguite con estensimetri induttivi; con base di misura di 50 mm, posti su tre piani di simmetria a 120°.

L'acquisizione dei dati è stata ottenuta mediante centralina UPM 60 gestita da programma informatico.

## 4. RISULTATI SPERIMENTALI

Nel seguito sono presentati i risultati ottenuti su una serie di provini di forma cilindrica di calcestruzzo ad altissima resistenza, anche additivato con fibre per determinare il tratto iniziale della legge  $\sigma$ - $\epsilon$  dal quale si è potuto desumere il modulo elastico e il valore della resistenza a compressione.

In tabella 4 sono riportati i valori della resistenza e del modulo elastico valutato dalla legge  $\sigma$ - $\epsilon$  come coefficiente angolare medio delle rette di regressione lineare delle misure in fase di carico e di scarico.

serie 1

$\phi$	fibre 0%		fibre 2%		fibre 4%	
	Rc (MPa)	Ec (MPa)	Rc (MPa)	Ec (MPa)	Rc (MPa)	Ec (MPa)
75 a	93	39592	110	41024	129	44655
75 b	97	38093	117	32649	128	43858
75 c	96	48690	111	34707	133	38482
100 a	77	49747	134	38958	143	37591
100 b	77	31466	99	38459	145	43003
100 c	122	36092	118	39252	130	36762

serie 2

$\phi$	fibre 0%		fibre 2%		fibre 4%	
	Rc (MPa)	Ec (MPa)	Rc (MPa)	Ec (MPa)	Rc (MPa)	Ec (MPa)
100 a	109	44875	72	48099	114	44743
100 b	114	44071	136	47389	127	44563
100 c	99	46362	121	45242	121	45874
100 d	114	46416	123	44846	117	44775

Tabella 4 Valori grandezze misurate

In figura 3, 4 e 5, sono riportati, a titolo di esempio, i tipici andamenti misurati per provini con diverse percentuali di contenuto di fibre.

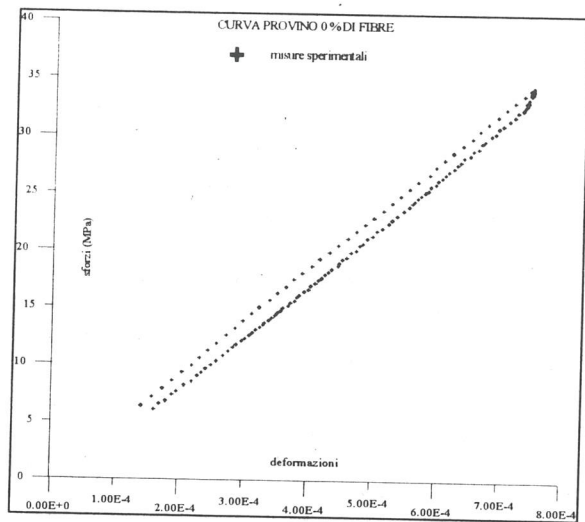


Figura 3 provino  $\phi=100$  a serie 2

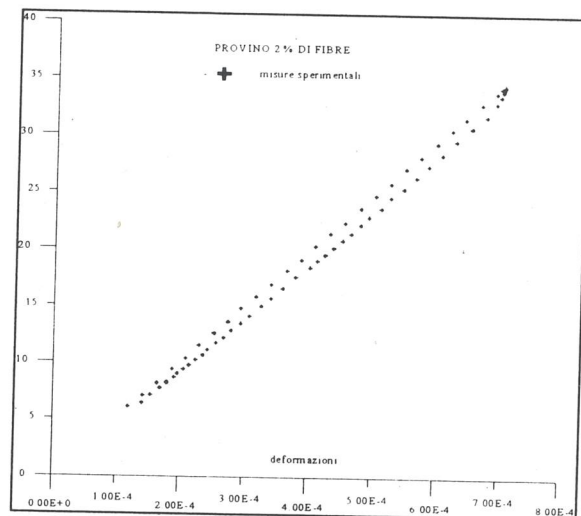
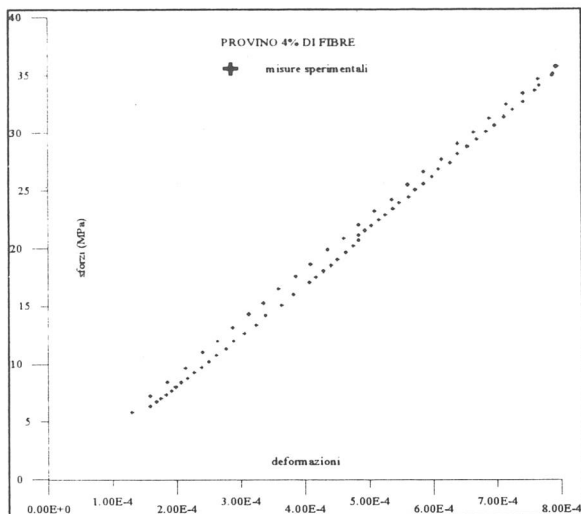


Figura 4 provino  $\phi=100$  c serie 2



Figura 5 provino  $\phi=100$  d serie 2

Gli andamenti mostrano un legame  $\sigma$ - $\epsilon$  con caratteristiche elastiche lineari (lo sfalsamento fra la fase di carico e quella di scarico è sostanzialmente dovuta all'inerzia strumentale).

È fondamentale, segnalare che i provini relativi alla serie 1 sono stati confezionati con stampi in materiale plastico, mentre i provini della serie 2 sono stati confezionati con stampi di acciaio.

Una elevata compattazione del materiale, consente poi di ottenere campioni esenti da difetti macroscopici. Sotto questo aspetto, stampi in acciaio hanno consentito di ottenere provini con migliori prestazioni meccaniche rispetto a stampi in materiale plastico (plexiglas, PVC).

Quantitativamente, i provini ottenuti in stampi di acciaio presentano una resistenza a compressione superiore di circa il 15÷25% a quella ottenuta con provini dimensionalmente simili, confezionati però con stampi in plastica [13].

Nella tabella 5 si riportano la resistenza media cilindrica  $f_{cm}$  e il modulo elastico  $E_c$ , determinate sui campioni diversi in contenuto percentuale di fibre in volume.

		serie 1					
		fibre 0%		fibre 2%		fibre 4%	
$\phi$		R <sub>cm</sub> (MPa)	E <sub>cm</sub> (MPa)	R <sub>cm</sub> (MPa)	E <sub>cm</sub> (MPa)	R <sub>cm</sub> (MPa)	E <sub>cm</sub> (MPa)
75		95	42125	113	36127	130	42332
100		92	39101	117	38889	139	39119

		serie 2					
		fibre 0%		fibre 2%		fibre 4%	
$\phi$		R <sub>cm</sub> (MPa)	E <sub>cm</sub> (MPa)	R <sub>cm</sub> (MPa)	E <sub>cm</sub> (MPa)	R <sub>cm</sub> (MPa)	E <sub>cm</sub> (MPa)
100		109	45431	113	46394	120	44989

Tabella 5 Valori grandezze medie delle misure

Si può osservare che il modulo elastico risulta essere poco influenzato dalle dimensioni del provino, come

era da attendersi (come per la resistenza in [13]), perché legato alla macrostruttura del materiale che prevede aggregati di dimensioni contenute (diametro massimo 3.2 mm). I provini della serie 1 forniscono valori medi del modulo elastico inferiori a quelli della serie 2. Questo è dovuto anche all'ottima qualità dei provini, ben compattati e molto regolari dal punto di vista geometrico per effetto del confezionamento [13] dei provini della serie 2 con stampi metallici. Il contenuto in fibre non incrementa, il modulo elastico del calcestruzzo. Si osserva anche, che il valore medio del modulo elastico ed il valore medio della resistenza a compressione, misurati sui provini della serie 2 con 0% di fibre, sono in accordo coi valori medi misurati in [08] per il mix P21 di composizione simile.

Inoltre, si può osservare, che i valori delle grandezze medie ottenute, ripropongono l'osservazione (ad es. [21]) di un aumento della resistenza media col contenuto di fibre.

Nella tabella 6 si riportano i valori medi dei moduli misurati ed i corrispondenti valori ottenuti con i modelli Voight e Voight modificato

fibre 2%	modulo medio calcolato	modulo con il modello Voight	Voight modificato
75 serie1	36127	39138	36817
100 serie1	38889	41999	39679
100 serie2	46394	49118	46797

fibre 4%	modulo medio calcolato	modulo con il modello Voight	Voight modificato
75 serie1	42332	45601	40960
100 serie1	39119	45451	40810
100 serie2	44989	50765	46124

Tabella 6

I valori di tabella 6 sono, per una più chiara interpretazione, diagrammati in figure 6 e 7.

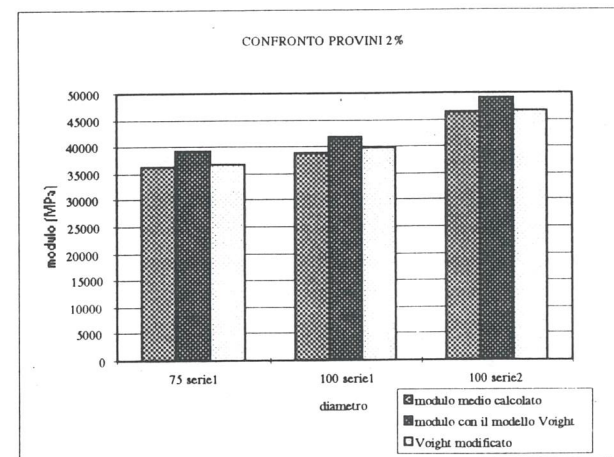


Figura 6

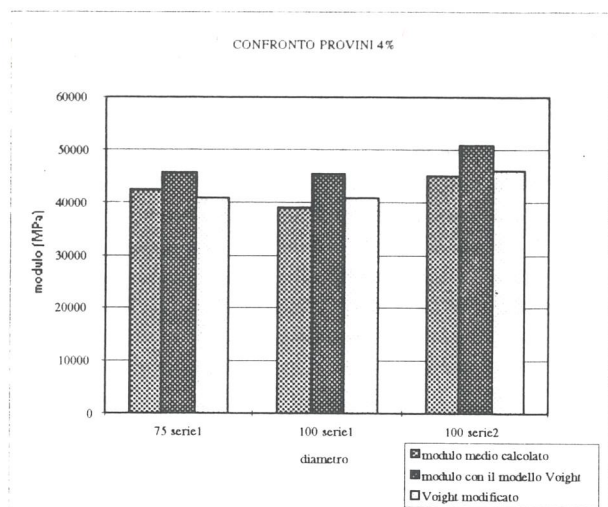


Figura 7

## 5. CONCLUSIONI

Sulla base dei risultati sperimentali ottenuti si può concludere quanto segue:

1. le espressioni di correlazione proposte dalle diverse normative forniscono valori del modulo elastico notevolmente diverse;
2. per esigenze di controllo di deformabilità si può procedere al mix design del calcestruzzo valutando prima il modulo elastico del calcestruzzo richiesto, e da questo risalire alla scelta dell'aggregato impiegando la correlazione proposta in [06];
3. la sostanziale indipendenza del valore del modulo elastico dal contenuto (2÷4%) di fibre;
4. sufficiente corrispondenza dei valori del modulo ottenuto sperimentalmente per i provini con fibre ed i valori forniti con la correlazione proposta in Voight modificato;
5. sufficiente corrispondenza dei valori del modulo ottenuto sperimentalmente per i provini senza fibre ed il valore ottenuto in [08] con calcestruzzi additivati con silice fume e con uguale rapporto a/c.

## RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è parte di un programma di ricerca che il CTG (Centro Tecnico di Gruppo Italcementi-Ciment Français) sta sviluppando in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano e con la sua Scuola di Specializzazione in Costruzioni in cemento armato "F.lli Pesenti". Gli autori ringraziano l'ing. G. P. Rosati e l'arch. M. Marazzini, per la preziosa assistenza prestata in fase di spe-

rimentazione, l'allievo della Facoltà di ingegneria del Politecnico di Milano, P. Perucchini, per il contributo prestato in fase di elaborazione dei risultati sperimentali.

## BIBLIOGRAFIA

- [01] C.E.B. "High performance concrete, recommended extensions to the Model Code 90, research needs", C.E.B. Bulletin d'information n.228, July 1995.
- [02] C.E.B. "High strength concrete, State-Of-The-Art-Report", C.E.B. Bulletin d'information n.197, August 1990.
- [03] A.C.I. 363R-92 "State of the art report on high strength concrete", A.C.I. 363R-92.
- [04] E.C.-2-ENV 206- Progettazione delle strutture cementizie, parte 1: regole generali e regole per gli edifici.
- [05] M. LL.PP. "Raccomandazioni tecniche sui calcestruzzi cementizi ad alta resistenza", Giornale A.I.C.A.P., n.11 Novembre 1996, allegato a "L'industria italiana del cemento".
- [06] C.E.B. "Application of high performance concrete, Examples-Projects-Regulations-Research", C.E.B. Bulletin d'information n. 222, November 1994.
- [07] [P. ALAEJOS GUTIERREZ, M. FERNANDEZ CANOVAS "The modulus of elasticity of high performance concrete", Materials and structures, 28, pag. 559-568, 1995.
- [08] T. H. WEE ET ALTR "Stress-strain relationship of High-Strength Concrete in compression" Journal of Materials in Civil Engineering, May 1996;
- [09] P. K. METHA, P.J.M. MONTEIRO: "Concrete: structure, properties and materials", Prentice-Hall 2nd ed., New Jersey, 1993.
- [10] A.M. NEVILLE: "Properties of Concrete", 3rd Edn, Longman Harlow, UK, 1981, pp 527-565.
- [11] D.M. 09/01/1196: "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche". (Gazzetta Ufficiale del 05/02/1996 n°29)
- [12] Integrazione a DIN 1045/07.88 per le classi da B65 a B115, Commissione Tedesca per il calcestruzzo armato DAfStb nell'Ist. Tedesco di unificazione delle norme Scharren Strasse 2-3, D-10178 Berlino centro.
- [13] M. ACITO ET ALTRI "Effetti dimensionali in elementi di calcestruzzo ad altissima resistenza", 11° Congresso CTE 1996.
- [14] M. LESSARD ET AL: "Testing high-strength concrete", ACI Mat. J., 90, 3, 1993, pp 303-308

- [15] **R. L. CARRASQUILLO ET AL:** "Properties of high strength concrete subject to short-term loads", ACI J. Proc. 78 .2. 1981, pp 171-178
- [16] **M. IMAN ET AL:** "Are current concrete strength tests suitable for high strength concrete?", Materials and Structures. 1995. 28. pp 384.
- [17] **C. VESTGAARD NIELSEN** "Ultra high-strength steel fibre reinforced concrete, part I. Basic strength proprieties of compresit matrix", Afdelingen for baerende konstruktioner, Denmark, Tekniske Universitet, Copenhagen, July 1995.
- [18] **J. P. ROMUALDI, G.B. BATSON.** "Mechanics of crack arrest in concrete". Journal of the Engineering Mechanics DIVISION, ASCE, Vol. 89, 1963
- [19] **J. M . ALWAN, A. E. NAAMAN** "New formulation for the elastic modulus of fibre-reinforced, quasi-brittle matrices", pag. 2443-2460
- [20] **H. H. BACHE:** "Densified Cement Ultra-fine Particle Based Materials", 2nd Int. Conf. on Superplasticizer in Concrete, Ottawa, 1981. pp. 35
- [21] **M. ACITO ET ALTRI,** "Resistenza caratteristica di materiali cementizi ad alta e altissima resistenza, 11° Congresso CTE, Napoli 1996.