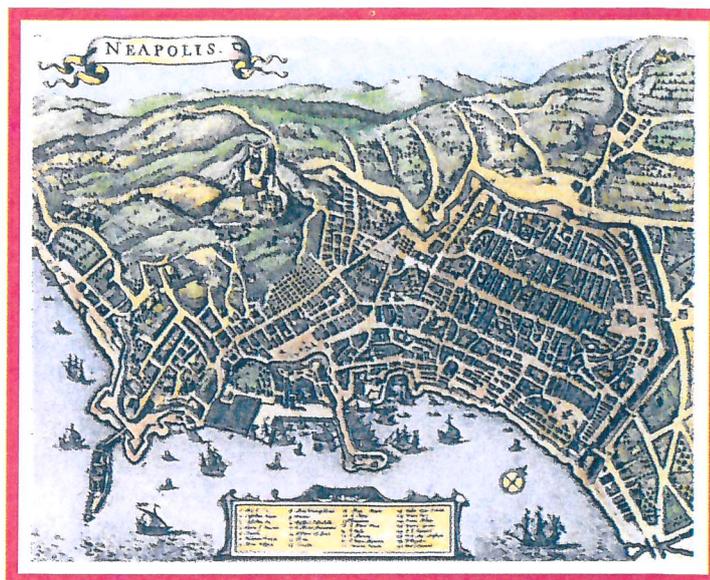




Collegio dei Tecnici della Industrializzazione Edilizia  
Via Giacomo Zanella 36-20133 Milano Tel. 02.713 880

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

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



sede del congresso  
**Castel Dell'Ovo, Napoli**



## EFFETTI DIMENSIONALI IN ELEMENTI DI CALCESTRUZZO AD ALTISSIMA RESISTENZA

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 effects of specimen size and specimen shape on the compressive strength of the material are examined. Tests on cylindrical and cubic specimens of varying sizes were performed.*

*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*

*Six different specimen types cast from three different high strength concrete compositions were considered. The compressive strengths of all specimen types and the conversion factors between them were evaluated and compared.*

### 1. INTRODUZIONE

In ingegneria civile risulta di fondamentale importanza la determinazione della tensione di rottura del materiale impiegato nelle costruzioni. I risultati sperimentali reperibili in letteratura e riferiti ai calcestruzzi ordinari (cfr. ad es. (01)) indicano chiaramente che la tensione di rottura (apparente) del calcestruzzo decresce con l'aumentare delle dimensioni geometriche dei provini. Questo è uno degli aspetti del cosiddetto effetto scala, caratteristico dei materiali eterogenei fragili come il calcestruzzo e le rocce, effetto di fondamentale importanza quando si deve "trasferire" una resistenza del materiale determinata in laboratorio al materiale impiegato nella realizzazione di strutture di grandi dimensioni, comunque superiori a quelle dei provini. Quindi la resistenza a rottura del materiale che costituisce una struttura reale non può essere considerata corrispondente a quella ottenuta dalle usuali prove di laboratorio su campioni di ridotte dimensioni. Questi effetti sono stati attribuiti in passato a svariate cause; fra queste possono citarsi l'influenza del confinamento dei piattini delle macchine di prova sulla resistenza e sulla rottura dei provini, le differenze di temperatura e di umidità tra superficie e parte interna di un provino, che

generano stati tensionali e differenze del grado di maturazione nel provino stesso (02).

Le normative, fornendo indicazioni sulle dimensioni dei provini da sottoporre a compressione per la valutazione della resistenza a rottura del calcestruzzo, cercano di garantire dimensioni significative per la valutazione di questa caratteristica meccanica.

Il primo approccio razionale al problema è dovuto a Weibull (03) che, su basi statistiche, determinava la resistenza di una struttura basandosi sulla probabilità di rottura associata ai difetti presenti nelle maggiori dimensioni. La resistenza decrescente con l'aumentare delle dimensioni è dovuta alla crescente probabilità della presenza di questi difetti nelle strutture di notevoli dimensioni geometriche.

Successivamente, anche Neville (04) suggeriva che l'effetto scala nel calcestruzzo potesse dipendere dalla probabilità di trovare microfessure aventi un orientamento ed una dimensione critica, probabilità che risulta maggiore al crescere delle dimensioni geometriche della struttura.

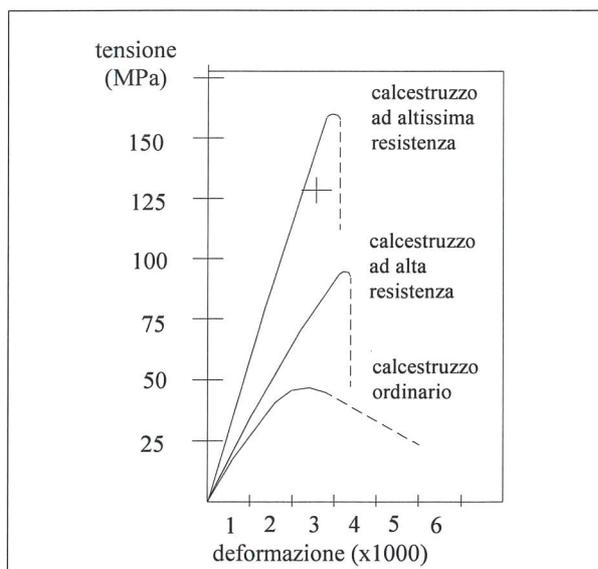
La prima questione che si pone, dunque, nella caratterizzazione di un materiale è l'individuazione delle dimensioni ottimali dei provini per le prove a compressione. Ciò è importante soprattutto nel caso dei calcestruzzi ad altissima resistenza, in quanto, come è facile intuire, l'elevata resistenza del materiale determina valori del carico di rottura a compressione molto elevati, quando le dimensioni dei provini fossero quelle previste per i calcestruzzi ordinari, cosicché si è costretti ad adottare provini di dimensioni più ridotte, col rischio di cadere nelle contraddizioni di cui si è detto. Inoltre, le presse in dotazione a laboratori ufficiali per le prove sui materiali da costruzione potrebbero risultare non adeguate, ove conservassero per i calcestruzzi ad alta ed altissima resistenza le dimensioni tipiche di quelle utilizzate per i calcestruzzi ordinari.

In questo lavoro si discute il problema delle dimensioni dei provini sulla base di risultati ottenuti in una serie di prove sperimentali a compressione, eseguite su campioni di calcestruzzo ad altissima resistenza, anche additivato con fibre, di forma cubica e cilindrica di dimensioni diverse. Viene esaminata la variazione di resistenza a compressione, in funzione delle dimensioni dei provini e del tipo di stampo. Lo studio ha lo scopo di suggerire le dimensioni ottimali dei provini per le prove a compressione ed individuare la correlazione esistente fra i risultati delle prove condotte su provini di forma cubica e cilindrica.

### 2. CALCESTRUZZO AD ALTA ED ALTISSIMA RESISTENZA

Il comportamento meccanico dei materiali ad alta ed altissima resistenza risulta notevolmente differente da quello dei calcestruzzi ordinari, come è chiaramente

sottolineato anche dalle normative più recenti (12) (13). Tipicamente, un calcestruzzo ordinario è un materiale non omogeneo, che evidenzia notevoli differenze di proprietà elastiche fra aggregati e pasta di cemento. Inoltre, è caratterizzato da una scarsa e non completa adesione pasta-aggregato. Le rotture, 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. Da un punto di vista macroscopico questo si traduce in una apprezzabile "duttilità" del materiale (Fig. 1).



**Figura 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.

Inoltre, scegliendo opportunamente aggregati di elevata qualità e forma, la loro resistenza e quella della pasta di cemento sono confrontabili e si ha un'ottima adesione sull'interfaccia. Di conseguenza, la distribuzione interna delle tensioni risulta più omogenea rispetto a 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 drastiche riduzioni di capacità portante (Fig. 1).

Tutto questo può essere comunque corretto con l'aggiunta di un'opportuna quantità di fibre di rinforzo che, specialmente in presenza di tensioni di trazione, conferiscono al materiale una notevole duttilità ed un'adeguata tenacità (cfr. ad es. (05)).

### 3. MATERIALI E ATTREZZATURA SPERIMENTALE

I materiali utilizzati per questo studio sono del tipo proposto per la prima volta da H. Bache (06) e sono definiti comunemente DSP (Densified Systems containing homogeneously arranged ultrafine Particles). Si tratta di malte ad altissima resistenza contenenti sabbia di quarzo e microsilice 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;
- microsilice 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 nella Tab.

I.

rapp. microsilice/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 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).

Le dimensioni dei grani della microsilice 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.

Per le prove sperimentali 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.

#### 4. RISULTATI SPERIMENTALI

Nella Tab. II si riportano la resistenza media cubica  $R_{cm}$  e la stima della deviazione standard  $s$  determinate con prove su 12 campioni diversi per geometria e contenuto percentuale di fibre in volume.

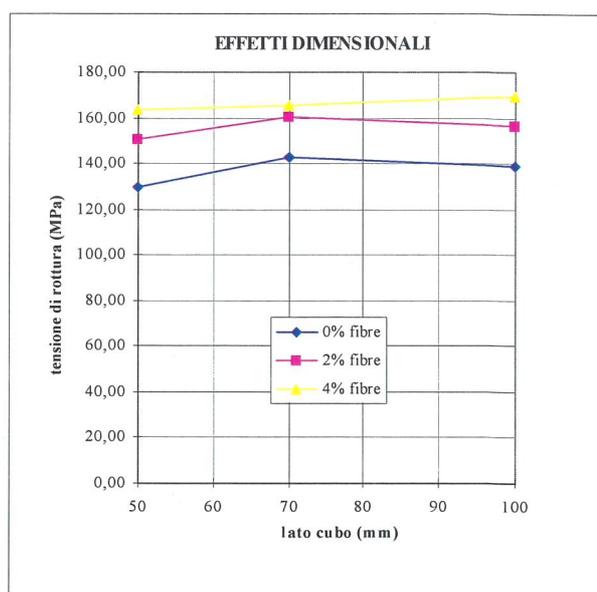
fibre	cubi 50 mm		cubi 70 mm		cubi 100 mm		
	%	$R_{cm}$	$s$	$R_{cm}$	$s$	$R_{cm}$	$s$
0		129.84	9.11	142.73	16.89	138.71	11.47
2		150.45	4.98	160.52	4.67	156.42	3.36
4		163.36	3.67	165.44	5.56	169.29	4.68

**Tabella II.** Resistenza media (MPa) e deviazione standard

Come si può osservare, la resistenza a compressione è risultata essere poco influenzata dalle dimensioni del provino, comunque assai meno che per i provini di un calcestruzzo ordinario (per i quali, come è noto, fatta 100 la resistenza di un cubo di 150 mm di lato, tale resistenza passa a 110 in provini con lato 100 mm e si riduce anche al disotto di 90 in provini di lato 300 mm). Si può rilevare quindi che, per questi materiali, non è necessario ricorrere a provini cubici di lato elevato per valutare una resistenza a compressione significativa. Questo è legato alla macrostruttura del materiale che prevede aggregati di dimensioni contenute (diametro massimo 3.2 mm). La deviazione standard risulta contenuta in tutti i casi esaminati; in particolare, i materiali non fibrorinforzati evidenziano valori comunque confrontabili con quelli riscontrabili nei calcestruzzi di resistenza ordinaria confezionati con processo di tipo industriale. Questo è dovuto anche all'ottima qualità dei provini, ben compattati e molto regolari dal punto di vista geometrico. La deviazione standard si riduce invece drasticamente nei provini fibrorinforzati. Presumibilmente, la ragione di questo risultato può essere attribuita alla maggiore duttilità del materiale fibrorinforzato, caratteristica che rende i provini assai meno sensibili a piccoli difetti di carattere geometrico.

I materiali senza fibre di rinforzo presentano rotture tipicamente esplosive, mentre i materiali con fibre si rompono in modo più graduale e controllabile sperimentalmente nelle prove a controllo di spostamento.

I risultati riportati in Tab. II sono sintetizzati in Fig. 2, che mostra la resistenza media in funzione delle dimensioni dei provini.



**Figura 2.** Resistenza media in funzione delle dimensioni dei provini

Un utile confronto può essere fatto considerando cubetti di lato 50, 100 e 200 mm, realizzati con calcestruzzo di resistenza più contenuta. In Fig. 3 si riporta il valore della resistenza rilevata sperimentalmente in funzione delle dimensioni dei provini. Come si può rilevare si osservano sperimentalmente valori delle resistenze nominali sempre più ridotti al crescere delle dimensioni. Comunque, la diminuzione di resistenza si riduce nel passaggio dai cubi di lato 100 mm a quelli di lato 200 mm. La resistenza tende quindi a stabilizzarsi al crescere delle dimensioni. Esiste quindi una dimensione oltre la quale non si evidenziano effetti dimensionali sulla resistenza a compressione del materiale. Solo con provini di lato assai inferiore a 40 mm, per il materiale qui esaminato, si rileverebbero apprezzabili incrementi di resistenza apparente.

Dai risultati ottenuti si può dedurre che le dimensioni dei provini necessari per determinare in laboratorio una resistenza nominale significativa risultano inferiori per i materiali di resistenza più elevata. Quindi, le dimensioni dei provini dovrebbero essere correlate alla resistenza nel senso che dimensioni più ridotte sono sufficienti per i materiali di migliore qualità.

Il contenuto in fibre, nel caso della sollecitazione di compressione semplice, incrementa in modo non significativo la resistenza del materiale (Fig. 4); nel caso di trazione per flessione, si osservano incrementi di resistenza anche del 100% con un limitato contenuto in fibre di rinforzo (05). Peraltro, in regime di compressione, i materiali fibrorinforzati consentono comportamenti post-critici più stabili.

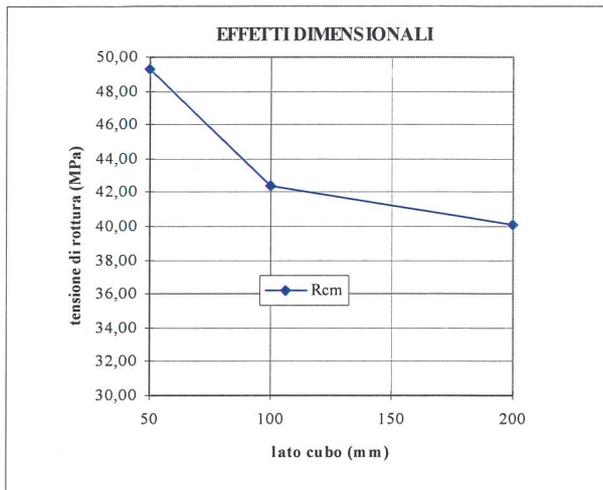


Figura 3. Resistenza media in funzione delle dimensioni

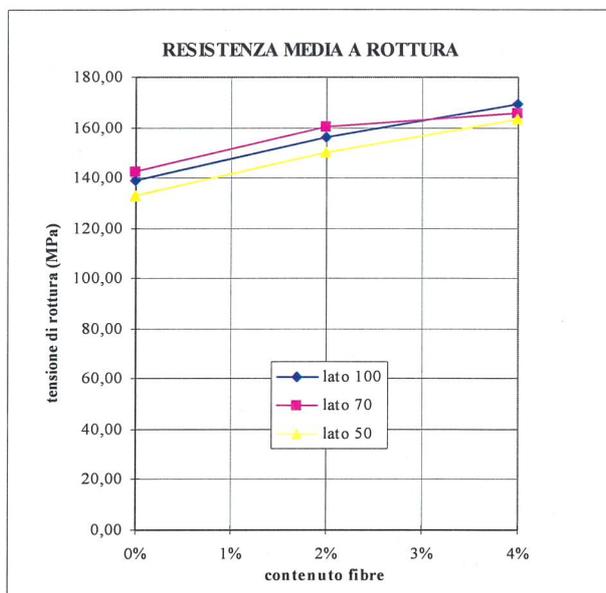


Figura 4. Resistenza media in funzione del contenuto di fibre e delle diverse dimensioni geometriche

Un altro aspetto interessante è il rapporto fra la resistenza cilindrica e cubica. In effetti, in molti paesi, fra i quali gli Stati Uniti e la Francia, la resistenza di riferimento è quella cilindrica mentre in altri paesi, come l'Italia, la Germania ed il Belgio, è tipico utilizzare provini cubici. Comunemente si afferma che il rapporto fra la resistenza cilindrica e quella cubica per il calcestruzzo è compreso fra 0.80 e 0.83 (07) in funzione della classe del calcestruzzo, consigliando di salire allo 0,85 e oltre per resistenze superiori a 65 MPa. Esperienze già condotte su materiali con resistenza compresa fra 60 e 130 MPa [riportate in (08), (09) e (10)] hanno evidenziato per questo rapporto valori decisamente più elevati, compresi fra 0.90 e 0.99. Per rilevare questo aspetto, sono stati realizzati provini cubici e cilin-

drici (con altezza/diametro=2) di differenti dimensioni, al fine di valutare questo rapporto fra le due resistenze per i materiali oggetto della ricerca. Le resistenze cubiche e cilindriche, rilevate in funzione della dimensione caratteristica  $d$ , sono riportate in Fig. 5; le prove si riferiscono a materiali con il 4% in volume di fibre.

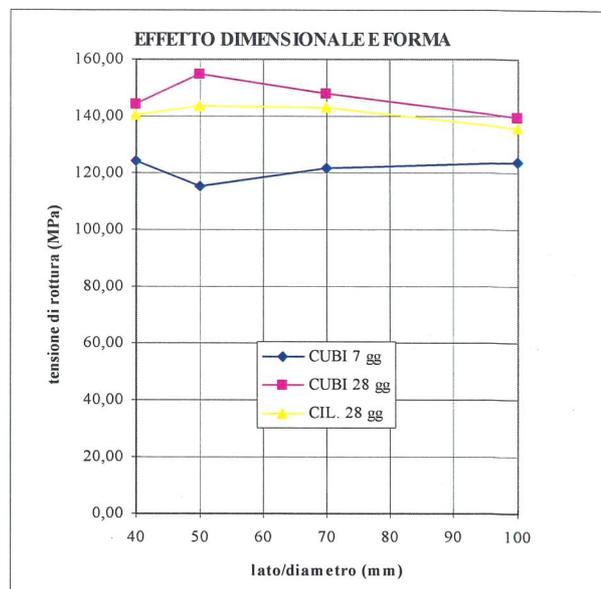


Figura 5. Resistenza cubica e cilindrica in funzione delle dimensioni caratteristiche

Dalla Tab. III si può rilevare che i valori del rapporto fra le due resistenze (a 28 gg)  $k_{cil/cub}$  sono superiori in tutti i casi a 0.90, avvicinandosi all'unità (si veda anche la Fig. 6).

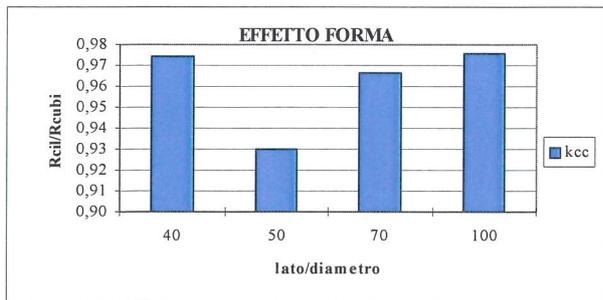
contenuto fibre	lato/diametro	coefficiente $k_{cil/cub}$
4%	40 mm	0.97
4%	50 mm	0.93
4%	70 mm	0.97
4%	100 mm	0.98

Tabella III. Coefficiente di correlazione tra resistenza cilindrica e cubica

Anche per materiali con una resistenza a compressione di circa 150 MPa, si evidenziano valori analoghi a quelli rilevati in (08), (09) e (10) per materiali con resistenze leggermente inferiori.

E' fondamentale, peraltro, una elevata compattazione del materiale, al fine 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 ot-

tenuta con provini dimensionalmente simili, confezionati con stampi in plastica (11).



**Figura 6.** Coefficiente di correlazione in funzione delle dimensioni caratteristiche

## 5. CONCLUSIONI

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

1. nel campo delle dimensioni considerate per i provini non si osservano importanti variazioni di resistenza a compressione del materiale;
2. per i materiali considerati, la resistenza a compressione non risulta particolarmente influenzata dal contenuto di fibre;
3. il rapporto fra resistenza cilindrica e cubica risulta notevolmente superiore (circa 0.97) a quello comunemente accettato per i calcestruzzi ordinari;
4. gli stampi in acciaio consentono di ottenere, a parità di condizioni, una migliore compattazione dei materiali rispetto agli stampi in materiale plastico, che si traduce in migliori caratteristiche meccaniche del materiale;
5. le dimensioni dei provini dovrebbero essere correlate alla resistenza nel senso che dimensioni più ridotte sono sufficienti per determinare una resistenza significativa in strutture realizzate con materiali di migliore qualità.

## 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". Tale programma riguarda lo studio e la caratterizzazione meccanica di materiali a base cementizia ad altissima resistenza per opere civili. L'obiettivo finale è quello di potere proporre la concreta realizzazione di opere costruite con questi materiali innovativi.

## 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) **W. WEIBULL:** "A Statistical theory of the strength of materials", Royal Swedish Academy of Engineering Society Proc., Vol 151, 1939, pp 1-45.
- (04) **A. M. NEVILLE:** "Some aspects of the strength of concrete", Civil Eng. Pub. rev. (London), 54, Part I, 1959, pp 1153-1165.
- (05) **G.L. GUERRINI, G. ROSATI:** "Comportamento meccanico di materiali cementizi ad altissima resistenza", L'Industria Italiana del Cemento, Vol. 66, No 6, 1996, pp. 456.
- (06) **H. H. BACHE:** "Densified Cement Ultra-fine Particle Based Materials", 2nd Int. Conf. on Superplasticizer in Concrete, Ottawa, 1981, pp. 35.
- (07) **ENV 206:** Norma Europea provvisoria, versione italiana: UNI 9858, febbraio 1989 - Calcestruzzo: prestazioni, produzione, getto e criteri di conformità.
- (08) **M. LESSARD ET AL:** "Testing high-strength concrete", ACI Mat. J., 90, 3, 1993, pp 303-308
- (09) **R. L. CARRASQUILLO ET AL:** "Properties of high strength concrete subject to short-term loads", ACI J. Proc, 78 ,2, 1981, pp 171-178
- (10) **M. IMAN ET AL:** "Are current concrete strength tests suitable for high strength concrete?", Materials and Structures, 1995, 28, pp 384.
- (11) **G.L. GUERRINI ET AL:** rapporto interno del Centro Tecnico di Gruppo Italcementi-Ciment Français, Bergamo, 1996.
- (12) **CEB-FIP:** Model Code, 1990 - High strenght concrete
- (13) **Dafstb:** Richtlinie für Hochfesten Beton, 1995

