

CALCESTRUZZO AD ALTA RESISTENZA MECCANICA.

**Proprietà fisiche ed elasto-meccaniche. Normative.
Realizzazioni strutturali**

INDICE**1.0 Introduzione****2.0 Proprietà fisiche ed elasto-meccaniche del calcestruzzo ad alta resistenza**

- 2.1 - Comportamento sforzo-deformazione in compressione
- 2.2 - Modulo elastico e coefficiente di Poisson
- 2.3 - Resistenza a trazione
- 2.4 - Ritiro igrometrico
- 2.5 - Deformazione viscosa

3.0 Normative

- 3.1 - La normativa finlandese
- 3.2 - La normativa norvegese
- 3.3 - La normativa olandese
- 3.4 - L'estensione del codice modello CEB-FIP 1990
- 3.5 - La normativa italiana

4.0 Realizzazioni strutturali con calcestruzzo ad alta resistenza**1.0 INTRODUZIONE**

Fino a qualche decennio fa i calcestruzzi ad alta ed altissima resistenza costituivano esclusivamente argomento di ricerca dei laboratori più avanzati di tecnologia del calcestruzzo. Negli ultimi dieci anni, invece, lo sviluppo e le applicazioni strutturali di questi materiali hanno subito un notevole incremento. I calcestruzzi ad alta resistenza, infatti, sono stati largamente utilizzati nella realizzazione delle strutture off-shore e di ponti di grande luce nel Nord Europa, dove per le eccezionali sollecitazioni meccaniche ed ambientali era impossibile impiegare i tradizionali conglomerati cementizi (1). Inoltre, grazie ormai alla facilità con cui si realizzano calcestruzzi con resistenze di 100 N/mm^2 , i conglomerati cementizi ad alta resistenza vengono convenientemente impiegati negli edifici di grande altezza per contenere la dimensione dei pilastri ai livelli inferiori (2). Numerose applicazioni, infine, vengono attualmente segnalate nelle strutture prefabbricate, negli impalcati da ponte, o per applicazioni speciali nel settore del condizionamento dei rifiuti nucleari (3-5).

L'odierna facilità di produzione di calcestruzzi con resistenze a compressione prossime ai 100 N/mm^2 può essere sostanzialmente ascritta ai seguenti fattori:

- migliore qualità intrinseca del cemento per un maggior contenuto di silicato tricalcico (C_3S), il costituente che più contribuisce alla resistenza meccanica, e per una maggiore finezza di macinazione (6);
- l'avvento degli additivi superfluidificanti che hanno consentito di ridurre drasticamente il valore del rapporto acqua/cemento senza penalizzare le capacità di flusso del calcestruzzo (7);
- la disponibilità del fumo di silice che per la ridotta dimensione dei granuli ($< 0.1 \mu\text{m}$) consente di ridurre la porosità della pasta di cemento e di migliorare - grazie alla diminuzione del bleeding - la qualità della matrice all'interfaccia pasta-aggregato (8).

Grazie a questi sviluppi della tecnologia del calcestruzzo il termine calcestruzzo ad alta resistenza ha assunto negli anni un diverso significato. Negli anni '50, ad esempio, negli Stati Uniti si considerava ad alta resistenza un calcestruzzo con una resistenza a compressione di soli 35 N/mm^2 (9). Già negli anni '60, invece, venivano normalmente commercializzati calcestruzzi con resistenza a compressione di circa 45 N/mm^2 . Negli anni '70 si registrano realizzazioni di opere in calcestruzzo con resistenze prossime ai 70 N/mm^2 , quali ad esempio i pilastri dell'edificio *Interfirst Plaza* a Dallas costruito nel 1983. Attualmente negli Stati Uniti calcestruzzi con resistenze superiori a 75 N/mm^2 rappresentano conglomerati usualmente disponibili per la realizzazione di edifici multipiano.

Per quanto attiene all'Europa occorre sottolineare che il termine "Calcestruzzo ad Alta Resistenza" non assume lo stesso significato in tutti i Paesi. Tuttavia, in linea di massima si può ammettere che appartengono a questa categoria - secondo quanto stabilito dal gruppo di lavoro FIP-CEB (10) - i calcestruzzi la cui resistenza caratteristica a compressione risulti superiore a quella massima ammessa dai regolamenti nazionali vigenti in ciascun paese (circa 60 N/mm^2).

I calcestruzzi ad alta resistenza (High Strength Concrete: HSC) posseggono proprietà fisiche ed elasto-meccaniche sensibilmente diverse rispetto a quelle dei tradizionali calcestruzzi con resistenze a compressione nell'ordine dei 25-40 N/mm². Pertanto, nel presente lavoro verranno analizzate alcune tra le più importanti proprietà dei calcestruzzi ad alte prestazioni, mettendo in evidenza le differenze più importanti tra HSC e calcestruzzi tradizionali. Inoltre, verranno analizzate alcune normative straniere per la progettazione delle strutture realizzate con calcestruzzo ad alta resistenza. Infine, verranno presentate alcune realizzazioni di opere con questo tipo di calcestruzzo.

2.0 PROPRIETÀ FISICHE ED ELASTO-MECCANICHE DEI CALCESTRUZZI AD ALTA RESISTENZA

Generalmente le raccomandazioni e le norme di legge vigenti in ogni paese relative al progetto delle strutture in conglomerato cementizio armato e precompresso forniscono alcune correlazioni che consentono di determinare le caratteristiche fondamentali del calcestruzzo, quali il comportamento sforzo-deformazione, la resistenza a trazione, il modulo elastico, ecc. Queste correlazioni sono basate su prove sperimentali ed esperienze condotte quasi esclusivamente su calcestruzzi la cui resistenza a compressione è inferiore a 40-50 N/mm². Queste correlazioni, quindi, non sono direttamente estendibili ai calcestruzzi con resistenza a compressione maggiori di 60 N/mm². Nel seguito, pertanto, verranno analizzate alcune proprietà fondamentali del calcestruzzo ad alta resistenza e verranno proposte alcune correlazioni - in genere diverse da quelle dei calcestruzzi tradizionali - tra le proprietà caratteristiche del conglomerato cementizio.

2.1 Comportamento sforzo-deformazione in compressione

Il comportamento sforzo-deformazione del calcestruzzo ad alta resistenza è stato ampiamente indagato (11-13) e può essere analizzato in Fig. 1. Come si può notare i calcestruzzi ad alta resistenza evidenziano:

- * un ramo ascendente molto più lineare rispetto ai calcestruzzi tradizionali;
- * la linearità del ramo ascendente si protrae fino a valori dello sforzo prossimi alla resistenza a compressione;
- * una maggiore deformazione - rispetto ai calcestruzzi tradizionali - in corrispondenza del massimo sforzo applicato;
- * una brusca caduta del ramo discendente ed una minore deformazione ultima entrambe indici di una spiccata fragilità del materiale.

Il comportamento mostrato dal calcestruzzo ad alta resistenza è da imputare quasi esclusivamente al miglioramento della qualità del materiale all'interfaccia pasta-aggregato. Grazie alla diminuzione del *bleeding* interno, per la presenza di fumo di silice, nei calcestruzzi ad alta resistenza l'interfaccia pasta-aggregato è molto meno

poroso e, quindi, nella fase di carico si verifica una drastica diminuzione delle microfessure che implica una maggiore linearità del tratto ascendente della curva sforzo-deformazione.

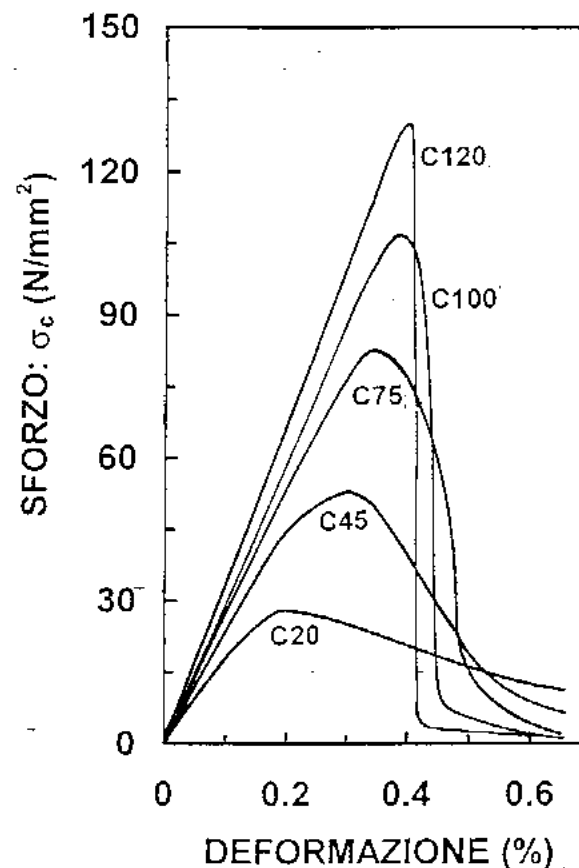


Figura 1- Diagramma sforzo-deformazione (a compressione) di calcestruzzi ad alta resistenza comparati con calcestruzzi tradizionali.

Nei calcestruzzi tradizionali le microfessure iniziano a manifestarsi all'interfaccia pasta-aggregato in corrispondenza di un valore dello sforzo pari al 65% della resistenza a compressione (11). Nei calcestruzzi ad alta resistenza, invece, la rottura dell'interfaccia pasta-aggregato si innesca in corrispondenza di un valore dello sforzo maggiore o uguale all'80% della resistenza a compressione del materiale. Questo comportamento, quindi, giustifica la linearità del tratto ascendente (nel grafico sforzo-deformazione) fino a valori di sforzo prossimi alla resistenza del materiale.

Per quanto attiene alla forma del ramo discendente della curva sforzo-deformazione, occorre tener conto che il calcestruzzo è un materiale composito costituito sostanzialmente dalla pasta di cemento e dagli aggregati. Entrambi i costituenti del calcestruzzo sono dei materiali fragili (Fig. 2). Tuttavia, il calcestruzzo tradizionale presenta un comportamento sostanzialmente duttile attribuibile all'enorme divario di rigidità dei materiali che lo compongono: il modulo elastico della pasta di cemento varia generalmente tra 15000 e 35000 N/mm², mentre il modulo elastico degli aggregati è solitamente superiore a 50000 N/mm² (Fig. 2a). A causa di questo divario tra i moduli elastici, nel calcestruzzo tradizionale si determinano delle concentrazioni di sforzo in corrispondenza dell'interfaccia pasta-aggregato che provocano la formazione di un reticolo di microfessure. Aumentando ulteriormente il valore dello sforzo applicato, una parte dell'energia disponibile viene consumata per promuovere l'ulteriore sviluppo delle microfessure. E' in questa fase - a seguito degli immancabili scorrimenti delle fessure nella pasta di cemento - che si verifica una sostanziale deviazione della linearità della curva sforzo-deformazione. Dopo il superamento della resistenza del materiale, infine, sono le fessure a determinare un'ulteriore redistribuzione dello sforzo all'interno del calcestruzzo e, quindi, una rottura di tipo duttile del materiale.

Nei calcestruzzi ad alte prestazioni, invece, il divario tra il modulo elastico della pasta di cemento e quello degli aggregati è sostanzialmente ridotto (Fig. 2b). Questo ovviamente determina una distribuzione più omogenea degli sforzi e, quindi, una ridotta microfessurazione all'interfaccia pasta-aggregato. La minore fessurazione determina una ridotta redistribuzione dello sforzo e di conseguenza una rottura di tipo fragile per questo tipo di materiale.

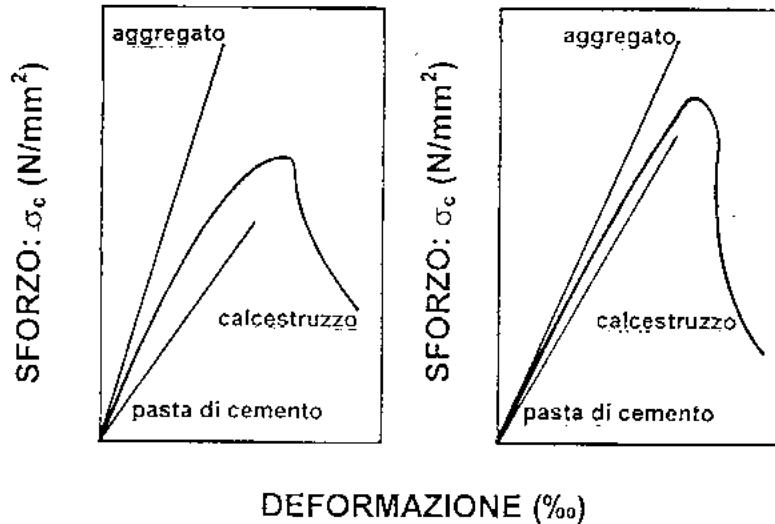


Figura 2 - Andamento schematico della curva sforzo-deformazione di calcestruzzi tradizionali (a), ad alta resistenza (b) e dei relativi costituenti.

Da quanto esposto emerge che in generale il comportamento deformativo dei calcestruzzi - e soprattutto quelli ad alta resistenza - è influenzato anche dalla qualità dell'aggregato ed in particolare dal suo modulo elastico. Aggregati con modulo elastico sostanzialmente uguale a quello della pasta di cemento (Fig. 3, gneiss: $E = 40000$ N/mm²), consentono di ottenere maggiori deformazioni in corrispondenza della massima tensione; tuttavia, essi esaltano la fragilità del materiale. Al contrario, aggregati con moduli di elasticità molto più elevati della pasta di cemento (Fig. 3, bauxite: $E = 100000$ N/mm²) conferiscono al conglomerato un comportamento più duttile.

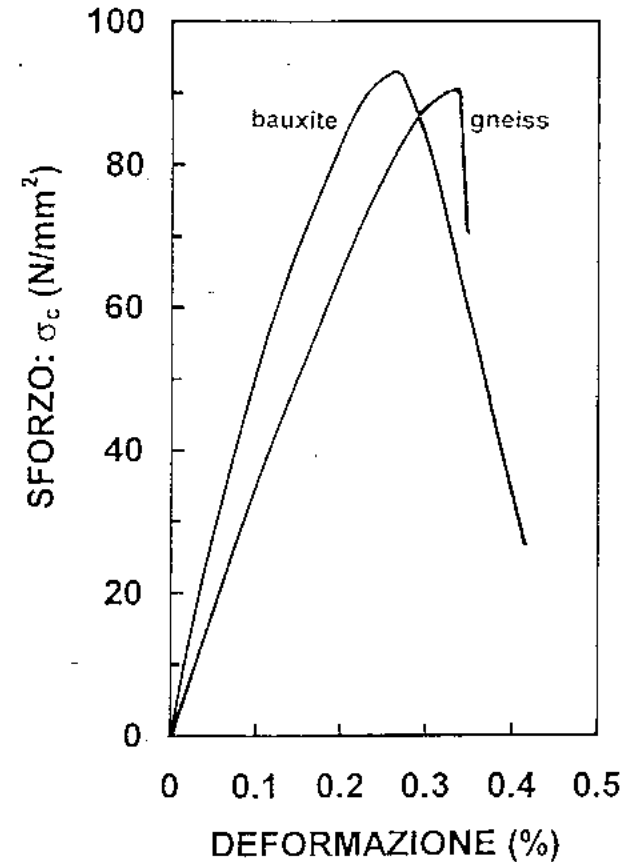


Figura 3 - Curva sforzo-deformazione di calcestruzzi aventi stessa resistenza a compressione, confezionati con aggregato di diverso modulo elastico.

2.2 Modulo di elasticità a compressione e coefficiente di Poisson

Numerose indagini sperimentali (14-16) hanno evidenziato che il modulo di elasticità cresce poco con la resistenza meccanica a compressione. Pertanto, le correlazioni generalmente riportate nelle raccomandazioni o nelle norme di legge per i calcestruzzi tradizionali che consentono di calcolare il modulo elastico (E) una volta nota la resistenza meccanica a compressione, non possono essere utilizzate per valutare i moduli di elasticità dei calcestruzzi ad alta resistenza. Queste correlazioni, infatti, tendono a sovrastimare il modulo elastico dei calcestruzzi con resistenze maggiori di 45 N/mm^2 .

Nell'estensione - pubblicata nel 1995 - al codice modello CEB-FIP 1990 (17-18) l'equazione:

$$E_{ci} = 10^4 (f_{ck} + 8)^{1/3} \quad [1]$$

valida per i soli calcestruzzi tradizionali con resistenza a compressione inferiore a 50 N/mm^2 , viene sostituita dall'equazione:

$$E_{ci} = 22000 [(f_{ck} + 8)/10]^{0.3} \quad [2]$$

oppure:

$$E_{ci} = 22000 [f_{cm}/10]^{0.3} \quad [3]$$

con E_{ci} = modulo elastico tangenziale

f_{ck} = resistenza caratteristica a compressione misurata su cilindri

f_{cm} = resistenza caratteristica a compressione media misurata su cilindri

Le suddette equazioni possono essere utilizzate anche per i calcestruzzi tradizionali. Nella Tabella 1 vengono riportati i valori del modulo elastico in funzione della resistenza caratteristica a compressione riferita a provini cilindrici calcolati impiegando l'equazione [2].

Tabella 1 - Modulo elastico tangenziale per calcestruzzo con diverse f_{ck} .

f_{ck}	12	20	30	40	50	60	70	80	90	100
E_{ci}	27	30	33	35	37	39	41	42	44	45

Per quanto attiene al coefficiente di Poisson i risultati delle indagini sperimentali hanno evidenziato che non esistono differenze sostanziali nel campo elastico tra calcestruzzi ad alta e bassa resistenza meccanica. I valori registrati generalmente si attestano tra 0.18 e 0.24 in funzione del valore dello sforzo applicato (19). Nel campo plastico, invece, i calcestruzzi ad alta resistenza sembrano evidenziare una minore

deformazione laterale per un minor numero di fessure presenti all'interfaccia pasta-aggregato rispetto ai calcestruzzi a bassa resistenza.

2.3 Resistenza a trazione

Al pari del modulo elastico, la resistenza a trazione cresce relativamente poco con la resistenza a compressione: se la resistenza meccanica a compressione raddoppia l'aumento della resistenza a trazione si attesta appena intorno al 20%. Secondo alcuni studi (20), inoltre, la resistenza a trazione indiretta (R_n) in un calcestruzzo a bassa resistenza è all'incirca il 10% della resistenza meccanica a compressione del materiale, mentre nei calcestruzzi ad alta resistenza la R_n si riduce ad appena il 5% della resistenza a compressione.

L'estensione (18) al CEB-FIP Model Code del 1990 (17) propone di impiegare per il calcolo della resistenza a trazione le seguenti formule:

$$f_{ctk,min} = 1.22 [(f_{ck} + 8)/18]^{0.6} \quad [4]$$

$$f_{ctk,max} = 2.38 [(f_{ck} + 8)/18]^{0.6} \quad [5]$$

$$f_{ctm} = 1.80 [(f_{ck} + 8)/18]^{0.6} \quad [6]$$

In Tabella 2 sono riportati i valori di resistenza a trazione in funzione della resistenza caratteristica a compressione riferita a provini cilindrici calcolati con le formule [4-6].

Tabella 2 - Resistenze a trazione per calcestruzzo di diverse R_{ck} .

f_{ck}	12	20	30	40	50	60	70	80	90	100
f_{ctm}	1.9	2.3	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4	4.7	5.0	5.3
$f_{ctk,min}$	1.3	1.6	1.9	2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.4	3.6
$f_{ctk,max}$	2.5	3.1	3.7	4.3	4.8	5.3	5.8	6.2	6.6	7.0

2.4 Ritiro igrometrico

I dati disponibili sulla stabilità dimensionale del conglomerato in ambiente secco sembrano evidenziare che i calcestruzzi ad alta resistenza siano caratterizzati da una maggiore velocità di contrazione, nella fase immediatamente successiva all'esposizione all'atmosfera insatura di vapore, rispetto ai calcestruzzi tradizionali (21). A lungo termine, generalmente dopo 4 mesi, invece, non si registrano sostanziali differenze nel valore di ritiro tra calcestruzzo ad alta e bassa resistenza meccanica (22).

Alcuni risultati (20) sembrano, inoltre, indicare che il ritiro dei calcestruzzi ad alte prestazioni sia molto più dipendente dal contenuto di acqua dell'impasto che dal rapporto acqua/cemento. Questi risultati potrebbero spiegare perchè i calcestruzzi ad

alta resistenza, ottenuti riducendo il rapporto acqua/cemento solo mediante l'incremento del legante ma senza alcuna riduzione dell'acqua d'impasto, hanno evidenziato valori di ritiro superiori a quelli dei calcestruzzi tradizionali (23).

2.5 Deformazione viscosa

I dati sperimentali a disposizione (24-26) indicano che la deformazione viscosa di calcestruzzi ad alta resistenza (realizzati con additivi super-riduttori di acqua per contenere il dosaggio di cemento) è sostanzialmente inferiore rispetto a quello di un calcestruzzo a bassa resistenza (Fig. 4).

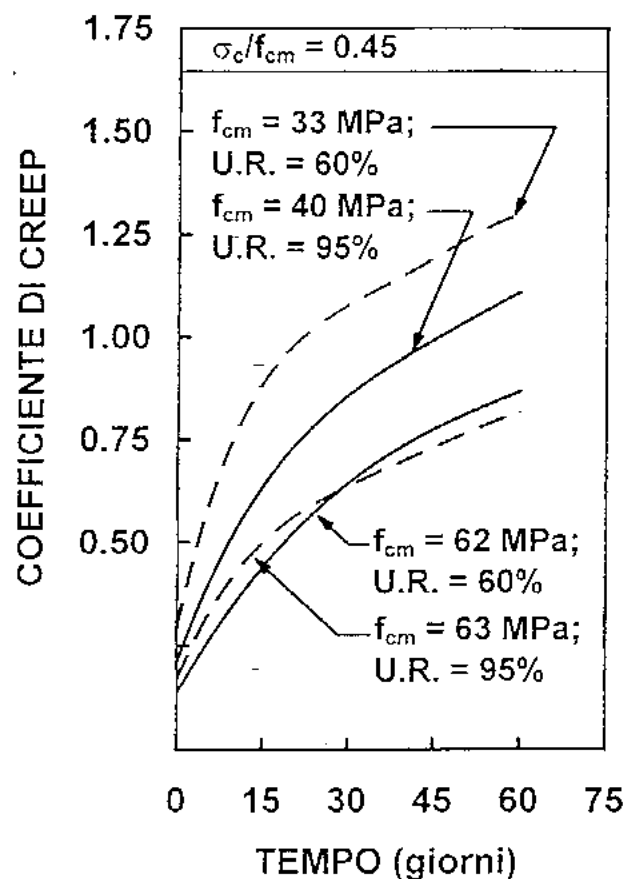


Figura 4 - Coefficiente di creep in funzione del tempo di applicazione del carico per calcestruzzo di diversa f_{cm} esposti in ambiente con UR = 60 o 95%.

In Fig. 5 è possibile valutare l'influenza del rapporto sforzo-resistenza sul coefficiente di creep, inteso come coefficiente moltiplicativo della deformazione elastica istantanea per calcolare la deformazione viscosa. Come si può notare, per un valore dello sforzo compreso tra il 50 e l'80% della resistenza a compressione, il coefficiente di creep - misurato dopo 40 giorni di applicazione del carico - risulta significativamente più basso per i calcestruzzi ad alta resistenza meccanica (27).

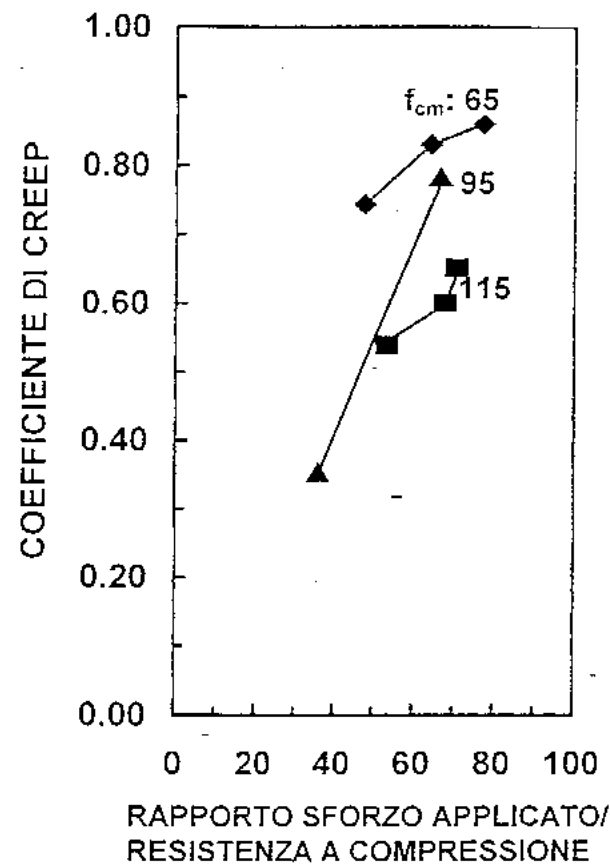


Figura 5 - Correlazioni tra coefficiente di creep e livello di sforzo per diversi calcestruzzi.

Occorre sottolineare che, sebbene i dati sperimentali disponibili sembrano indicare per i calcestruzzi ad alta resistenza valori di deformazione viscosa più bassi rispetto a quelli tradizionali, il Working Group che ha preparato l'estensione (18) al CEB-FIP Model Code 90, non avendo raggiunto su questo argomento una conclusione unanime,

ha demandato ad una commissione specifica il compito di analizzare il comportamento sotto carichi costanti dei calcestruzzi ad alte prestazioni.

3.0 LE NORMATIVE

Nel presente paragrafo vengono esaminate alcune normative internazionali che prevedono l'impiego dei calcestruzzi ad alta resistenza. Generalmente, queste normative sono state sviluppate in quei paesi - quali la Svezia, la Norvegia, la Finlandia, etc. - dove le condizioni di aggressione ambientale sono così severe da richiedere l'impiego di un calcestruzzo ad alta resistenza più per ragioni di durabilità che per effettive esigenze di carattere statico.

La rassegna delle normative internazionali si concluderà con un'analisi della Estensione al CEB-FIP Model Code 1990 già più volte richiamata nel presente lavoro nei paragrafi sul modulo elasticità e sulla resistenza a trazione.

3.1 La normativa finlandese

Nella normativa finlandese, ed in particolare nel supplemento *DBY34* del 1991 al *Finnish Code Rak MK B4 1983/94*, si trova che:

- è ammesso l'impiego di un calcestruzzo con resistenza a compressione misurata su provini cubici maggiore di 60 N/mm^2 (*K60*), ma non superiore a 100 N/mm^2 (*K100*); la resistenza caratteristica a compressione misurata su provini cilindrici (f_{ck}) si ottiene moltiplicando K per 0.7;
- la resistenza a trazione del calcestruzzo per le classi *K70*, *K80*, *K90* e *K100* risulta rispettivamente pari a 3.3, 3.5, 3.7 e 3.9 N/mm^2 ;
- il modulo elastico del calcestruzzo (E_c) è assunto pari a 38700 N/mm^2 indipendentemente dalla classe di resistenza del calcestruzzo;
- la deformazione viscosa è pari a quella di un calcestruzzo con un quantitativo di acqua inferiore a 170 kg/m^3 ridotta del 30%;
- il diagramma sforzo-deformazione per le verifiche allo stato limite ultimo è quello riportato in Fig. 6: esso è costituito da una trilatera in cui il primo segmento di retta ha una pendenza che corrisponde ad $E_c = 38700 \text{ N/mm}^2$ dall'origine fino a $0.6 f_{ck}$; il secondo segmento da $0.6 f_{ck}$ raggiunge il punto di coordinate (ϵ_{co}, f_{ck}) ; infine, l'ultimo segmento orizzontale prosegue fino al punto di coordinate (ϵ_{cu}, f_{ck}) . I valori di ϵ_{co} ed ϵ_{cu} sono entrambi funzione di f_{ck} : ϵ_{co} vale 1.8‰ e 2.2‰ rispettivamente per *K60* e *K100*; ϵ_{cu} vale 3.5 e 2.7‰ per gli stessi valori di K ;
- per le verifiche a taglio si farà riferimento alle proprietà del calcestruzzo con *K60* indipendentemente dall'effettiva qualità del conglomerato cementizio impiegato (28). E' probabile che quest'ultima limitazione sia da attribuire sia alla pratica assenza del meccanismo di *interlock* (testimoniato dalla rottura degli aggregati nelle prove di trazione indiretta) che alla scarsità di risultati disponibili in regime di sforzi biassiali (29).

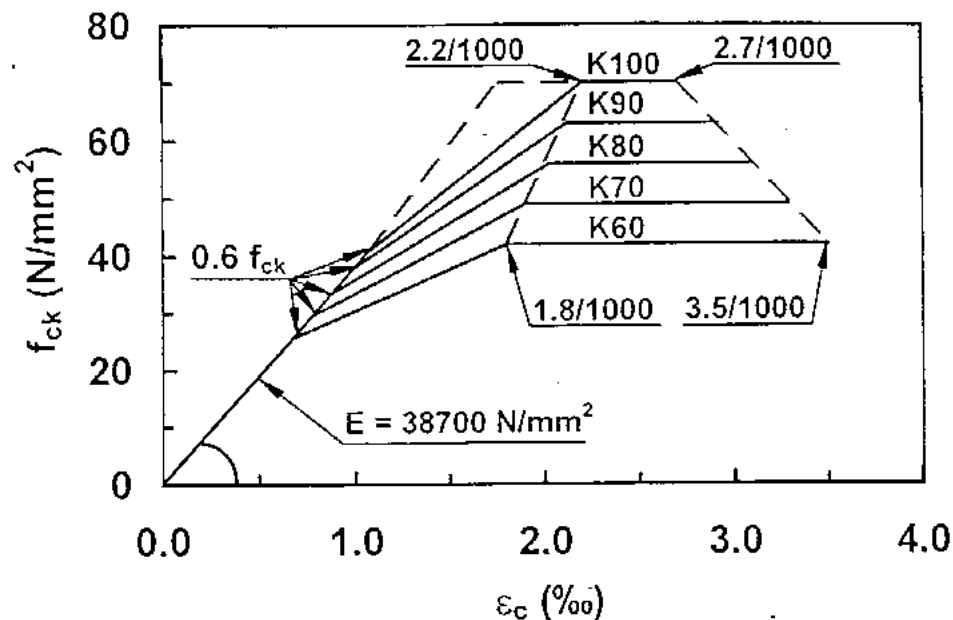


Figura 6 - Diagramma sforzo-deformazione secondo la normativa finlandese.

3.2 La normativa norvegese

La normativa norvegese (*Norwegian Code NS 3473* del 1992) consente l'impiego di calcestruzzi con una resistenza caratteristica massima a compressione misurata su provini cubici di 105 N/mm^2 .

E' interessante notare come la normativa norvegese introduca il concetto di resistenza meccanica a compressione *in situ* (f_{cm}). Tale resistenza è così calcolabile:

$$f_{cm} = f_{ck} \cdot 0.56 + 2.8 \quad [7]$$

La resistenza a compressione *in situ* consente, quindi, il calcolo della resistenza meccanica di progetto (f_{cd}) attraverso il coefficiente di sicurezza (γ_m) che viene assunto pari a 1.4:

$$f_{cd} = f_{cm} / \gamma_m = f_{cm} / 1.4 \quad [8]$$

In Fig. 7 è riportato il diagramma schematico sforzi-deformazioni secondo la normativa norvegese.

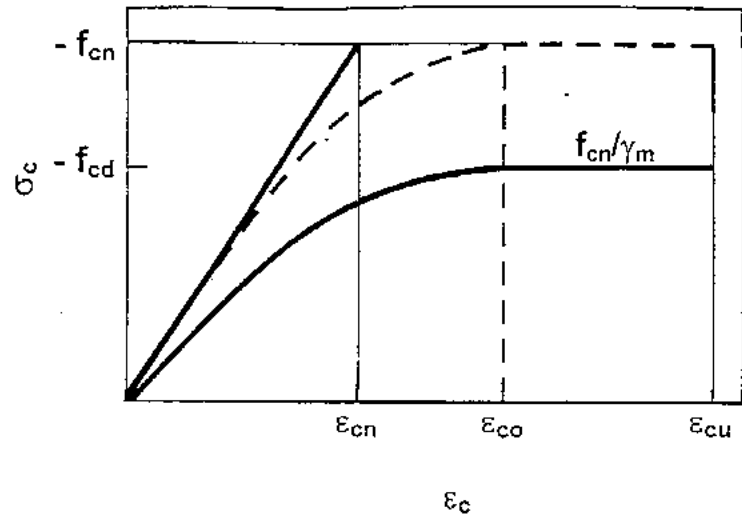


Figura 7 - Andamento schematico sforzo-deformazione secondo la normativa norvegese.

In Fig. 7 :

$$\epsilon_{cn} = f_{cn}/E_{cn} \text{ ed } E_{cn} = 9500 (f_{cn})^{0.3} \quad [9]$$

$$\epsilon_{co} = [0.004 f_{cn} + 1.9] \cdot 10^{-3} \quad [10]$$

$$\epsilon_{cu} = [(2.5m - 1.5) \epsilon_{cn} \text{ con } m = \epsilon_{co}/\epsilon_{cn}] \quad [11]$$

In Fig. 8 sono riportate le curve sforzo-deformazione per le verifiche allo stato limite ultimo secondo la normativa norvegese per calcestruzzi con diverse classi di resistenza.

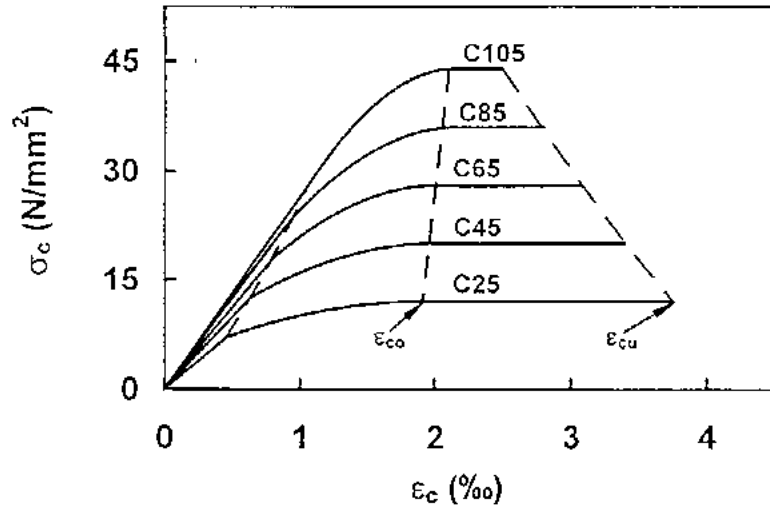


Figura 8 - Diagrammi sforzo-deformazione secondo la normativa norvegese.

Nella Tabella 3 vengono, inoltre, riportati i valori della resistenza a trazione caratteristica (f_{tk}) e quelli della resistenza a trazione *in situ* (f_{tn}) per calcestruzzi aventi classi di resistenza caratteristica a compressione su cubi variabile da 15 a 105 N/mm². Il valore della resistenza a trazione di progetto si ottiene dividendo f_{tn} per 1.4.

Tabella 3 - Resistenza a trazione caratteristica ed *in situ* secondo la normativa norvegese.

f_{ck}^*	15	35	45	55	65	75	85	95	105
f_{tk}	1.55	2.55	2.95	3.3	3.65	4.0	4.3	4.6	4.9
f_{tn}	1.0	1.7	2.0	2.25	2.50	2.60	2.7	2.7	2.7

*La normativa norvegese usa per la resistenza caratteristica su cubi lo stesso simbolo che in altre normative (ad esempio Eurocodici) viene adottato per il valore caratteristico su cilindri.

3.3 La normativa olandese

Nel supplemento alle norme olandesi *NEN 6720*, *NEN 5950* ed *NEN 6722* è ammesso l'impiego di calcestruzzi con resistenza caratteristica a compressione (f_{ck}) misurata su provini cubici di 105 N/mm².

La resistenza a compressione di progetto (f_{cd}) vale:

$$f_{cd} = K f_{ck}/\gamma_c \quad [12]$$

con: γ coefficiente di sicurezza pari a 1.2;

K fattore di riduzione che tiene conto sia della differenza tra la resistenza misurata su provini cubici e provini cilindrici sia degli effetti viscosi dovuti all'azione di carichi permanenti:

$$K = (785 - f_{ck})/1000 \quad [13]$$

Per quanto attiene ai diagrammi σ - ϵ per le verifiche allo stato limite ultimo (Fig. 9) essi sono costituiti essenzialmente da una bilatera in cui il tratto ascendente è individuato dal modulo elastico (E_c):

$$E_c = 35900 + 40 f_{ck} \text{ (MPa)} \quad [14]$$

e prosegue fino ad ϵ_{c1} .

Il secondo tratto è orizzontale (con ordinata pari a f_{cd}) e prosegue fino ad ϵ_{cu} .

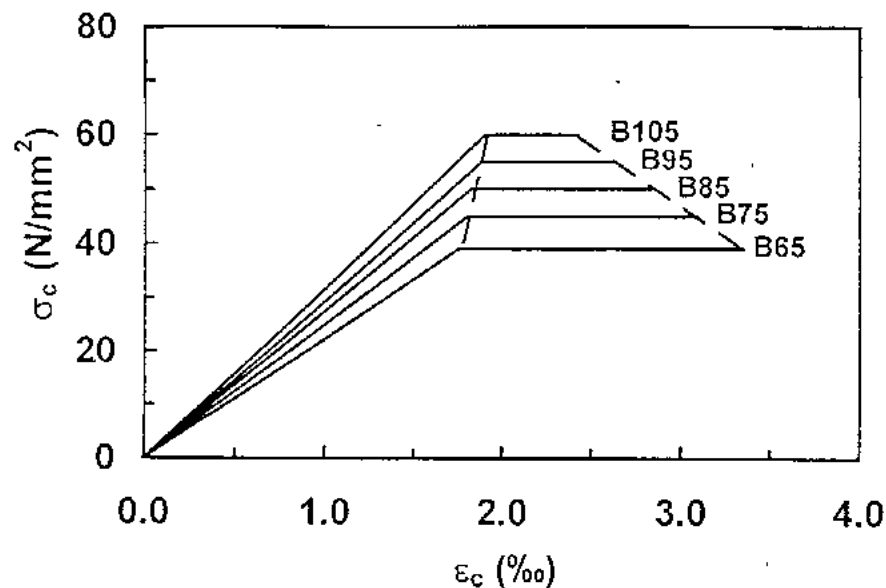


Figura 9 - Diagrammi sforzo-deformazione secondo le normative olandesi.

Per quanto attiene alla resistenza a taglio, il contributo del calcestruzzo, indipendentemente dalla classe, è pari a quello che si avrebbe con $f_{ck} = 65 \text{ N/mm}^2$. In sostanza, nel calcolo della resistenza a taglio di progetto la resistenza a trazione di progetto (f_{ctd}) viene assunta pari al valore che corrisponde al calcestruzzo con $f_{ck} = 65 \text{ N/mm}^2$:

$$f_{ct} = 0.7 (3 + 0.02 f_{ck}) / 1.4 \quad [15]$$

3.4 L'estensione del Codice Modello CEB-FIP 1990

Come già anticipato nei paragrafi relativi al modulo elastico (2.2), alla resistenza a trazione (2.3) oltre che al ritiro ed alla deformazione viscosa (2.4 e 2.5), nel 1995 è apparso sul Bollettino CEB n. 228 un'estensione al Codice Modello CEB-FIP 90 ("High Performance Concrete, Recommended Extensions to the Model Code 90, Research Needs"). L'obiettivo di questo Gruppo di Lavoro è stato quello di analizzare criticamente tutte le caratteristiche e le correlazioni tra le varie proprietà del calcestruzzo con l'intento di estendere l'impiego ai calcestruzzi con resistenza a compressione, misurata su provini cilindrici, maggiore di 50 N/mm^2 e fino ad un massimo di 100 N/mm^2 .

Le modifiche più importanti apportate dal Gruppo di Lavoro al Codice Modello riguardano innanzitutto il coefficiente di sicurezza γ_c . Questo valore, attesa la maggiore

fragilità dei calcestruzzi ad alta resistenza, è stato aumentato attraverso l'introduzione di un fattore moltiplicativo:

$$\gamma_{hsc} = 1 / (1.1 - f_{ck} / 500) \quad [16]$$

Il fattore γ_{hsc} vale 1 e 1.11 rispettivamente per f_{ck} pari a 50 e 100 N/mm^2 ; pertanto γ_c vale 1.5 e 1.66 per f_{ck} uguale rispettivamente a 50 e 100 N/mm^2 .

È stato, inoltre, proposto un diagramma sforzo-deformazione per la verifica delle sezioni inflesse e pressoinflesse. Questo diagramma (Fig. 10) è definito da una curva che dall'origine raggiunge il punto ϵ_{c1} ed è quindi completato da un tratto orizzontale fino ad ϵ_{cu} . L'esponente n che individua il tratto iniziale della curva ed i valori di ϵ_{c1} ed ϵ_{cu} possono essere calcolati in funzione del valore di f_{ck} :

$$\epsilon_{c1} = 0.002 + 0.5 (f_{ck} - 50) \cdot 10^{-5} \quad [17]$$

$$\epsilon_{cu} = 0.0025 + 0.002 (1 - f_{ck} / 100) \quad [18]$$

$$n = 2 - 0.008 (f_{ck} - 50) \quad [19]$$

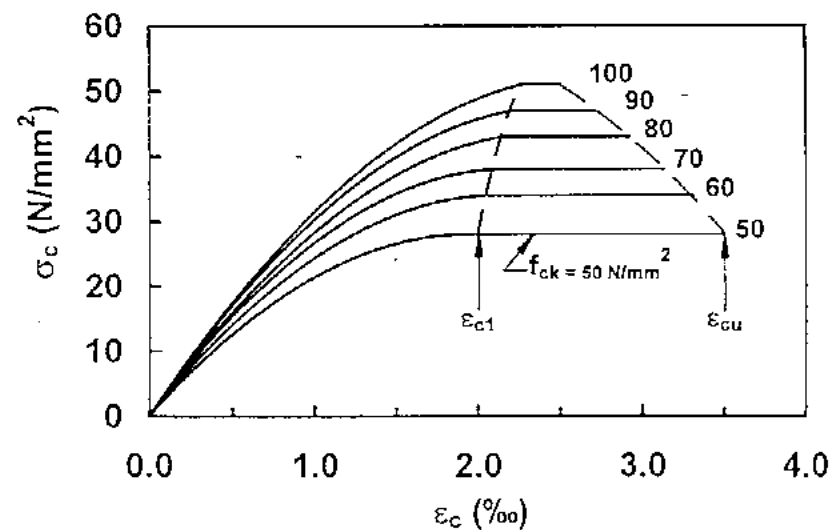


Figura 10 - Diagrammi sforzo-deformazione secondo l'estensione del Codice Modello CEB-FIP 1990.

Per quanto attiene alla verifica a taglio, relativamente all'analisi delle bielle di calcestruzzo compresse si conferma la validità dell'equazione utilizzata per il calcestruzzo a bassa resistenza in quanto questa formula è già di per sé sufficientemente cautelativa:

$$f_{ct2} = 0.60 (1 - f_{ck} / 250) \cdot f_{cd} \quad [20]$$

Infatti, raddoppiando il valore della resistenza meccanica a compressione (ad esempio da 50 a 100 N/mm²) la tensione di calcolo f_{cd2} subisce un'incremento modesto (da 16 a 22 N/mm²) pari al 38% circa.

Per quanto attiene alle verifiche allo stato limite di esercizio, c'è da ritenere che le formule valide per il calcestruzzo tradizionale sono cautelative per i calcestruzzi ad alta resistenza attese le migliori condizioni di fessurazione di questi conglomerati cementizi.

3.5 La normativa italiana

Come è ben noto, la normativa italiana sebbene permetta l'impiego di calcestruzzi ad alte prestazioni meccaniche, non consente di assumere nei calcoli statici valori della resistenza caratteristica su cubi superiori a 55 N/mm². Pertanto, il calcestruzzo ad alta resistenza viene impiegato quasi esclusivamente in quelle strutture soggette a particolari condizioni di aggressione ambientale (ambienti solfatici, ambienti acidi) che impongono l'adozione di ridotti rapporti acqua/cemento per ragioni di durabilità e conseguentemente comportano elevate resistenze meccaniche per il conglomerato cementizio. L'utilizzo del calcestruzzo ad alta resistenza è, inoltre, esteso ad applicazioni particolari quali i pannelli per le anime delle casseforti - dove si richiede un'elevata resistenza alla perforazione - o i tubi per condotte in pressione soggette a forti fenomeni di cavitazione.

Stante queste limitazioni i calcestruzzi ad alta resistenza non sono stati impiegati per la realizzazione di edifici oppure di ponti come è, invece, avvenuto più o meno estesamente nel Nord Europa ed Oltreoceano.

4.0 REALIZZAZIONI STRUTTURALI CON CALCESTRUZZI AD ALTA RESISTENZA

Nel presente paragrafo vengono riportati alcuni esempi di realizzazioni strutturali con calcestruzzi ad alta resistenza.

Un esempio di utilizzazione ottimale dei calcestruzzi ad alta resistenza riguarda il loro impiego negli elementi che risultano prevalentemente compressi, quali ad esempio i pilastri di edifici multipiano. Un interessante applicazione in questo settore delle costruzioni ha riguardato la realizzazione di due edifici a Seattle di 58 e 44 piani (*Two Union Square* e *Pacific First Center* rispettivamente). Il calcestruzzo ad alta resistenza è stato impiegato per il riempimento di pilastri in acciaio circolari. Inizialmente, era stato richiesto un calcestruzzo con una resistenza di progetto di 70 N/mm². Tuttavia, per l'esigenza di aumentare la rigidità dei pilastri venne utilizzato un calcestruzzo con una resistenza media di 115 N/mm² il cui modulo elastico si attestava intorno a 50000 N/mm².

Il calcestruzzo venne confezionato miscelando gli ingredienti nelle seguenti proporzioni:

Cemento	513 kg/m ³
Silica Fume	43 kg/m ³
Superfluidificante	18.8 kg/m ³
Acqua	130 kg/m ³
Aggregati (D _{max} =10 mm)	1765 kg/m ³
Acqua/cemento	0.25

Un'altra interessante applicazione del calcestruzzo ad alta resistenza riguarda la costruzione dell'edificio della *Grande Arche de la Defense* a Parigi. L'edificio alto all'incirca 130 m e con una luce di 70 m fu costruito dall'impresa Bouygues, l'unica a proporre la realizzazione delle travi (a doppio T) al piano più alto, mediante il getto in opera di un calcestruzzo con una resistenza caratteristica di 60 N/mm². Grazie all'impiego del fumo di silice (30 kg/m³) e di additivi fluidificanti ritardanti fu possibile pompare il calcestruzzo ad un'altezza di 130 m, ed a 400 m circa di distanza dal mescolatore con pressioni di pompaggio di circa 60 bar senza segregazione nell'impasto e con elevata uniformità di prestazioni, come è testimoniato dal ridotto valore dello scarto quadratico medio (circa 5 N/mm²).

Altre interessanti applicazioni del calcestruzzo ad alta resistenza riguardano la realizzazione di travi da ponte precomprese. Per queste strutture le elevate resistenze meccaniche possono essere imposte sia da considerazioni di carattere strutturale che da esigenze di durabilità al fine di garantire una vita utile di almeno 100 anni per queste infrastrutture particolarmente costose. Ad esempio, nella costruzione del ponte *Storebelt* in Danimarca le prescrizioni di capitolato imponevano per il rapporto acqua-legante un valore massimo di 0.35. A questo rapporto acqua/legante corrisponde generalmente una resistenza a compressione di circa 65 N/mm² indipendentemente dalle sollecitazioni meccaniche cui il ponte è sottoposto. Simili requisiti richiesti per il ponte *Bergsoysundet* determinarono, per garantire la durabilità del calcestruzzo, l'impiego di un calcestruzzo con una resistenza di circa 95 N/mm².

Una delle più belle applicazioni del calcestruzzo ad alta resistenza è quella relativa al ponte *Perthuiset* che, con una luce di 132 m, attraversa il fiume Loira in Francia. I 33 elementi che costituiscono l'impalcato furono realizzati in opera con calcestruzzo la cui resistenza media a 28 giorni raggiungeva il valore di 80 N/mm².

Ulteriori campi di impiego del calcestruzzo ad alta resistenza riguardano la realizzazione di tunnel sottomarini, quali ad esempio quelli costruiti al di sotto del Canale della Manica per collegare la Francia all'Inghilterra. In questo caso la resistenza a compressione elevata è stata dettata maggiormente da esigenze di durabilità oltre che da esigenze legate al processo produttivo (necessità di raggiungere resistenze a compressione di 20 N/mm² in 6-8 ore per produrre economicamente i conci prefabbricati per il rivestimento del tunnel).

Interessanti applicazioni del calcestruzzo ad alta resistenza si segnalano, inoltre, nel settore dei contenitori per reattori nucleari ($f_{ck} = 65$ N/mm²), nei tubi e nelle piattaforme *offshore* dei mari del Nord.

BIBLIOGRAFIA

- (1) T. Larsen, S. Helland, "Experience from the Use of High Strength Concrete on 3 Sites in Norway", Proceedings of the 1st Int. Symposium on the Utilization of High Strength Concrete, pp. 517-526, Stavanger, Norway (1987).
- (2) Randall, Foot, "High Strength Concrete for the Pacific First Center", Concrete International, pp. 14-16, April (1989).
- (3) Matsumoto, "Precast Prestressed Concrete Truss Railway Bridge using Extremely High Strength Concrete", Proc. of IABSE Congress (1976).
- (4) S. Helland, "High Strength Concrete used in Highway Pavements", Proceedings of the 2nd Int. Symposium on the Utilization of High Performance Concrete, Berkeley, USA (1990).
- (5) S.M. Torrenti, V. Matte, V. Maret, C. Richet, "High Integrity Containers for Interim Storage of Nuclear Wastes Using Reactive Powder Concrete", Proceedings of the Fourth Int. Symposium of the Utilization of High Strength/High Performance Concrete, pp. 1407-1413, Paris France (1996).
- (6) M. Collepardi, L. Coppola, "Durabilità e restauro delle opere in calcestruzzo", pp. 3-4, Ed. Enco, Spresiano (1992).
- (7) M. Collepardi, "Water Reducers/Retarders", V.S. Ramachandran Ed., Noyes publication, New Jersey, p. 286 (1995).
- (8) H.H. Bache, "Densified Cement/Ultra-Fine Particle Based Materials", presentato alla 2nd Int. Conference on Superplasticizers in Concrete, 35 pagine, Ottawa, Canada (1981).
- (9) H.G. Russel, "High Strength Concrete in North America", Proceedings of the 1st Int. Symposium on the Utilization of High Strength Concrete, pp. 561-572, Stavanger, Norway (1987).
- (10) FIP-CEB Working Group, "High Strength Concrete. State of the Report", August (1990).
- (11) Carrasquillo et al., "Microcracking and Behaviour of HSC subject to Short-Term Loading", ACI-Journal, May-June (1981).
- (12) Tognon, Ursella, Coppetti, "Design and Properties of Concretes with Strength over 150 kgf/cm²", ACI-Journal, May-June (1981).
- (13) S. Smeplass, H. Justenes, E.J. Sellevold, T. Ronning, "Results from the Norwegian Research Project: Materialutvikling Hoyfast Betong", Report available from the Cement and Concrete Research Institute, Trondheim (1990).
- (14) Carrasquillo, Slate, Nilson, "Properties of High Strength Concrete Subjected to Short-Term Loading", ACI-Journal, May-June (1981).
- (15) Bernhardt, Hoff, "Hoyfast betong". Delrapport 0. Forsok med bjelder i hoyfast betong "HSC", SINTEF report STF65 A85021.
- (16) Hoiseth, Hoff, Jensen, Hoyfast betong. Delrapport 2. Soyler under sentrisk last. SINTEF report STF65 A83049.
- (17) CEB Bulletin d'Information n° 203, "CEB-FIP Model Code 1990", Final Draft, Luglio (1991).

- (18) CEB Bulletin d'Information n° 228, "High Performance Concrete. Recommended Extensions to the Model Code 90. Research Needs", Luglio (1995).
- (19) S. Ahmad, S.P. Shah, "High Strength Concrete - A Review. First symposium on Utilization of High Strength Concrete", Stavanger (1988).
- (20) State-of-the-art-report on High Strength Concrete. Reported by ACI Committee 363, ACI Journal July-August 1984, pp. 362-411.
- (21) Tomaszewicz, Bynboe, Jensen, Hoyfast betong. Delrapport 5. Pilotforsok med kryp i hoyfast betong. SINTEF report STF65 A 85006.
- (22) Charif, Jaccoud, Alou, "Reduction of Deformations with the Use of Concrete Admixtures", RILEM Symposium, Barcelona, May (1990).
- (23) Parrott, "The Production and Properties of High Strength Concrete", Concrete, November (1969).
- (24) "High Strength Concrete in Chicago High Rise Buildings", Task Force Report No. 5, Chicago Committee on High Rise Buildings, pp. 63, February (1977).
- (25) H.G. Russell, W.G. Corley, "Time Dependent Behavior of Columns in Water Tower Place", Douglas McHenry International Symposium on Concrete and Concrete Structures, SP-55, American Concrete Institute, Detroit, pp. 347-373, (1978).
- (26) A.S. Ngab, F.O. SLate, A.H. Nilson, "Behavior of High Strength Concrete Under Sustained Compressive Stress", Research Report No. 80-2, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, pp. 201, February (1980).
- (27) Bjerkeli, Tomaszewicz, Jensen, "Deformation Properties and Ductility of High Strength Concrete". Second International Symposium on Applications of High Strength Concretes, Berkeley (1990).
- (28) CEB Bulletin d'Information N°222, "Application of High Performance Concrete", Novembre (1994).
- (29) P. Marro, "Le strutture di calcestruzzo ad alta prestazione: i modelli di calcolo, le realizzazioni". Atti del seminario "L'Evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni", pp. 163-184, Malta (1996).
- (30) Randall, Foot, "High strength Concrete for the Pacific First Center", Concrete International, pp. 14-16, April (1989).