

CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO: CARATTERISTICHE GENERALI E COMPORTAMENTO CHIMICO-FISICO *

Bruno ROSSI **

* La prima parte dell'articolo "Calcestruzzo fibrorinforzato: caratteristiche generali" è già pubblicata sulla rivista "STRADE & AUTOSTRADE n° 55 Gennaio/Febbraio 2006" e autorizzata dalla Direzione della Casa Editrice Edi-Cem Srl

** Ingegnere Civile Edile; Corporate Technical Specialist, Officine Maccaferri S.p.A

INTRODUZIONE

Un calcestruzzo fibrorinforzato può essere ottenuto aggiungendo all'impasto diversi tipi di fibre: metalliche (essenzialmente in acciaio), naturali e sintetiche di vario tipo. L'aggiunta di fibre nel calcestruzzo ha diversi scopi:

- aumento della duttilità;
- aumento della resistenza a fatica;
- miglioramento della resistenza all'impatto ed all'abrasione;
- riduzione della microfessurazione e degli effetti del ritiro;
- miglioramento della resistenza al fuoco.

L'uso del calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio è in continua espansione, sia in termini quantitativi che applicativi. Dai settori tradizionali del calcestruzzo proiettato per il rivestimento provvisorio delle gallerie e del calcestruzzo gettato in opera per le pavimentazioni industriali, questa tecnologia si sta diffondendo alla prefabbricazione, come nel caso di tegoli per la copertura di capannoni e dei conci per il rivestimento finale delle gallerie.

Le figure che seguono mostrano le tipologie di fibre di maggior utilizzo: fibre di polipropilene (Figura 1), fibre di vetro (Figura 2), fibre Fe-Cr flessibili (Figura 3), fibre da filo di acciaio (Figura 4), fibre da filo di acciaio a basso contenuto di C (Figura 5), fibre di acciaio ondulate (Figura 6), fibre di cellulosa (Figura 7), mesofibre di acciaio (Figura 8), fibre di acciaio rettilinee (Figura 9), microfibre di acciaio (Figura 10).



Figura 1



Figura 2



Figura 3



Figura 4



Figura 5

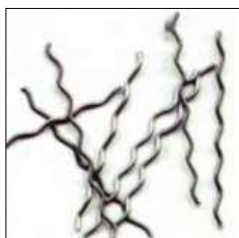


Figura 6



Figura 7

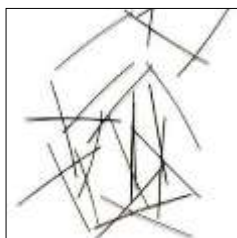


Figura 8



Figura 9



Figura 10

Attualmente, per le fibre d'acciaio e per i calcestruzzi ottenuti con esse, esistono diverse norme e progetti di norme, nazionali ed internazionali.

CARATTERISTICHE DELLE FIBRE DI ACCIAIO PER IL RINFORZO DEL CALCESTRUZZO

La norma UNI 11037/03 – "Fibre d'acciaio da impiegare nel confezionamento di conglomerato cementizio rinforzato", definisce i requisiti che le fibre in acciaio devono possedere per il rinforzo del calcestruzzo e ne identifica le caratteristiche chimiche, geometriche e meccaniche, con le relative classificazioni e tolleranze. Di seguito le caratteristiche citate:

- Lunghezza L ;
- Diametro equivalente D_e ;
- Rapporto d'aspetto $\lambda = L / D_e$;
- Resistenza a trazione R_i ;
- Forma;
- Processo produttivo;
- Composizione chimica;
- Rivestimento superficiale.

Nella Tabella 1 sono indicate le caratteristiche meccaniche dei materiali delle fibre. Per completezza di informazione, specie nel caso di fibre non metalliche, sarebbe bene richiedere al produttore anche le seguenti altre proprietà meccaniche:

- Allungamento a rottura $\varepsilon = \Delta L / L$;
- Modulo elastico E ;
- Tensione allo 0,2 di deformazione residua $R_{p0,2}$.

Fibra	Diametro (μm)	Peso specifico (10^3 kg/m^3)	Modulo Elastico (N/mm^2)	Resistenza a trazione (N/mm^2)	Allungamento a trazione (%)
Acciaio	5 - 500	7,84	200.000	500 – 2.000	0,5 - 3,5
Vetro	9 - 15	2,60	70.000 – 80.000	2.000 – 4.000	2 – 3,5
Polipropilene	20 - 200	0,90	5.000 – 7.000	500 – 750	8
Nylon	-	1,10	4.000	900	13 - 15
Carbonio	9	1,90	230.000	2.600	1
Kevlar	10	1,45	65.000 – 133.000	3.600	2,1 - 4
Acrilica	18	1,18	14.000 – 19.500	400 – 1.000	3

Tabella 1: caratteristiche meccaniche dei materiali delle fibre

CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI CALCESTRUZZI RINFORZATI CON FIBRE

Per la parte relativa alle proprietà meccaniche dei calcestruzzi fibrorinforzati, tra le norme più importanti vi sono la UNI 11039/03 – “Calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio” ed il prUNI U32045140 – “Progettazione, esecuzione e controllo degli elementi strutturali in calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio”.

Nella Parte I della UNI 11039 si definiscono le caratteristiche ed i requisiti dei calcestruzzi rinforzati con fibre d'acciaio, confezionati in cantiere, in stabilimento di prefabbricazione, in laboratorio e preconfezionati.

Particolare rilevanza riveste il prospetto sulle classi di duttilità D_0 e D_1 , dove D_0 indica la duttilità del fibrorinforzato nel campo di apertura media di fessura compreso fra 0 e 0,6 mm ed è espresso dal rapporto tra la resistenza equivalente $f_{eq(0-0,6)}$ e la resistenza di prima fessurazione $f_{f.}$, mentre D_1 si riferisce al campo di fessura compreso fra 0,6 e 3,0 mm ed è pari al rapporto tra $f_{eq(0-0,6)}$ e $f_{eq(0,6-3,0)}$ (per la determinazione di tali grandezze si veda la Parte II).

La norma UNI 11039 definisce esplicitamente “non rinforzati con fibre d'acciaio” quei calcestruzzi per i quali si abbiano valori dell'indice di duttilità $D_0 < 0,5$. La ragione di tale scelta sta nella constatazione sperimentale (Figura 11, Figura 12, Figura 13) che provini di calcestruzzo senza fibre, testati a flessione, per classi di calcestruzzi da C20 a C90, hanno dato valori di duttilità $D_0 \sim 0,20 \div 0,35$. Ove per altri tipi di fibre manchino norme specifiche, la UNI 11039 costituirebbe un punto di riferimento per la definizione delle caratteristiche meccaniche dei compositi relativi. Da ciò conseguirebbe che un calcestruzzo rinforzato con un altro tipo di fibra, diversa dall'acciaio, avente un indice di duttilità $D_0 < 0,5$ si dovrebbe definire, secondo i criteri di cui sopra, “non rinforzato”.



Figura 11

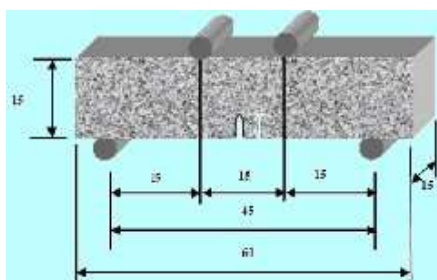


Figura 12

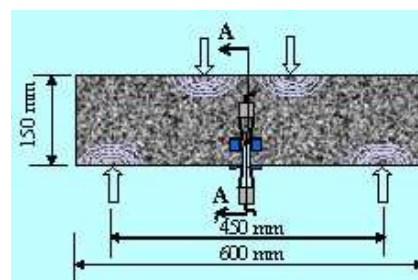


Figura 13

Nelle due figure sotto sono riportati i grafici sperimentali di prove di flessione UNI 11039 per cls ottenuti aggiungendo la stessa percentuale volumetrica di fibre (0,5 % in volume), ma utilizzando fibre sintetiche nel primo caso (Figura 14) e

fibre di acciaio nel secondo caso (Figura 15). Nel primo caso, fibre sintetiche di tipo polimerico, l'indice di duttilità D_0 è risultato minore di 0.5.

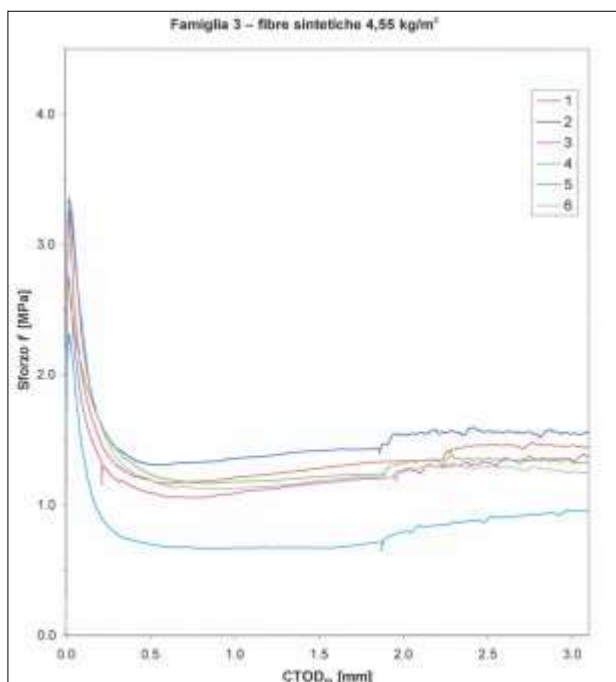


Figura 14

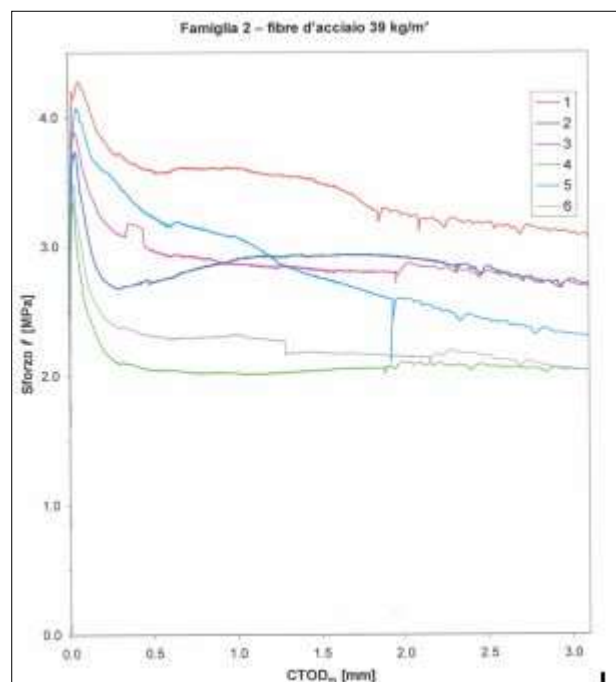


Figura 15

Sempre nella Parte I, si indica il dosaggio minimo di fibre di acciaio in 25 kg per m^3 di composito (0,32 % di volume). Il dosaggio minimo è stato definito dopo un'estesa campagna sperimentale condotta a supporto del lavoro di redazione della norma, la quale ha accertato che, pur con diversi tipi di fibre, per i relativi compositi, si otteneva una duttilità minima $D_0 \geq 0,5$.

In conclusione, per le fibre di acciaio esistono attualmente due prescrizioni, sul dosaggio minimo e sulla duttilità minima, che hanno lo scopo di tutelare gli applicatori riguardo al mantenimento di un livello prestazionale adeguato. Ad integrazione di quanto esposto va detto che, recentemente, sono state pubblicate le Istruzioni CNR_DT204_2006, le quali danno una definizione analoga del dosaggio minimo e della duttilità minima necessaria agli usi strutturali, espressa in termini di resistenza a trazione diretta residua in esercizio che, indirettamente, può essere ricavata anche dalle prove di flessione UNI 11039.



Figura 16



Figura 17

COME SI IDENTIFICA UN CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO

Di seguito, un riepilogo delle caratteristiche che identificano un calcestruzzo fibrorinforzato:

- Classe di resistenza a compressione (UNI EN 206-1);
- Classe di consistenza (UNI EN 206-1);
- Classe di esposizione UNI EN 206-1);
- Dimensione massima dell'aggregato (UNI EN 12620);

- Classe di resistenza di 1^a fessurazione (UNI 11039);
- Indice di duttilità D_0 (UNI 11039);
- Indice di duttilità D_1 (UNI 11039).

A tali caratteristiche andrebbero aggiunte informazioni supplementari quali:

- Caratteristiche delle fibre impiegate (secondo UNI 11037 ed aggiuntive);
- Dosaggio minimo (in % di volume o in kg/m^3) necessario al raggiungimento della duttilità minima.

Il problema nasce per altri tipi di fibre, per le quali non esistano norme che, ad esempio, indichino il dosaggio minimo (in kg/m^3 o in % in volume) necessario al raggiungimento della duttilità minima e, più in generale, un insieme di regole che permettano di controllare i requisiti delle fibre e le proprietà meccaniche dei relativi compositi rinforzati.

Una risposta potrebbe venire dal progetto di norma prUNI U32045140 – “Progettazione, esecuzione e controllo degli elementi strutturali in calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio”, redatto dal Gruppo di Lavoro “Calcestruzzo Fibrorinforzato” della Sottocommissione SC4 “Prefabbricazione” della “Commissione Ingegneria Strutturale” (CIS) dell'UNI. Tale norma definisce i requisiti di resistenza, funzionalità e durabilità degli elementi strutturali realizzati in calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio, con o senza la presenza aggiuntiva di armature tradizionali (lente e/o pretese). La norma si applica agli elementi prefabbricati, sia di serie che occasionali, ed alle strutture gettate in opera. Ai fini delle applicazioni strutturali del fibrorinforzato si distinguono diversi tipi di comportamento:

- Tipo A - degradante (softening);
- Tipo B - incrudente (hardening);
- Tipo C - sovraresistente (over-resistant).

In funzione del tipo di comportamento, si potrà tenere conto o meno della resistenza a trazione del materiale in determinate situazioni statiche. Ad esempio, nel caso di comportamento degradante (softening), ottenibile con una percentuale in volume di fibre d'acciaio relativamente contenuta, per gli impieghi strutturali previsti dal progetto di norma, per lo specifico stato di sollecitazione, è richiesto un valore di resistenza equivalente pari a:

$$P_{eq} \geq 0,5 P_1$$

dove P_{eq} è la resistenza equivalente per una determinata deformazione o apertura di fessura e P_1 è la resistenza di prima fessurazione. In caso contrario, nelle verifiche di resistenza va trascurata la resistenza a trazione del fibrorinforzato

Conclusioni

Il calcestruzzo fibrorinforzato è un materiale in rapida espansione. Le possibilità offerte dalla tecnologia e dalla chimica dei materiali ne allargano continuamente le possibilità applicative. Si pensi all'uso con gli autocompattanti (*Self Compacting Concrete*) e con i compositi cementizi ad alta ed altissima resistenza (*Ultra High Performance Fibre Reinforced Cement Composite*): è possibile ottenere materiali duttili con altissime prestazioni meccaniche, con comportamento incrudente a trazione diretta, con contenuti superiori al 2% in volume di fibre di acciaio ad alto contenuto di carbonio.

Questa evoluzione necessita di un adeguato impianto normativo che regolamenti i controlli sui componenti e sui compositi stessi. In ambito italiano (Istruzioni CNR_DT204_2006) ed Europeo è in atto un'intensa attività normativa.

COMPORTAMENTO CHIMICO-FISICO

Il comportamento fisico e chimico va valutato secondo i seguenti fenomeni:

- Ritiro a breve termine (plastico);
- Ritiro a lungo termine (idraulico);
- Durabilità;
- Gelo-disgelo;
- Carbonatazione;
- Corrosione delle fibre;
- Esposizione al fuoco.

Per ognuna delle suindicate caratteristiche verranno forniti adeguati riferimenti normativi.

Ritiro a breve termine (plastico) – Plastic Shrinkage Cracking

La fessurazione da ritiro plastico si sviluppa a causa della perdita d'acqua nel passaggio dalla fase liquida alla fase plastica. Il ritiro plastico del calcestruzzo può essere efficacemente controllato con l'uso di microfibre di tipo polimerico in virtù dell'elevatissima superficie specifica di tali fibre per unità di volume e quindi della loro capacità di trattenere acqua per tensione superficiale.

Esistono diversi metodi per misurare la fessurazione, uno dei quali è l'AASHTO PP34-98 “Standard Practice for Estimating the Crack Tendency of Concrete”. Di recente è stata redatta una norma specifica per il fibrorinforzato: ASTM C1579-06 “Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert)”.

Ritiro a lungo termine (idraulico) – Long Term Shrinkage cracking

Durante la maturazione del calcestruzzo continua la perdita di acqua e questo comporta una riduzione volumetrica: nel caso ciò avvenisse liberamente non ci sarebbero tensioni nella struttura. Qualora, invece, la struttura non fosse libera di contrarsi, si svilupperebbero delle tensioni di trazione che possono superare la capacità resistente del materiale provocando l'insorgere di fessure diffuse nel calcestruzzo. Si può ovviare a questo fenomeno aggiungendo all'impasto fibre corte, in quantità adeguata. Le fibre ottimali in questo senso sono le microfibre di acciaio ($\phi \leq 0,20$ mm) per via della maggiore superficie specifica e, quindi, della possibilità di interagire con la matrice cementizia.

Uno dei metodi usati per misurare gli effetti del ritiro, in condizioni non confinate, è la norma *ASTM C157 "Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-cement Mortar and Concrete"*. Al momento, non ci sono norme per la condizione confinata, per calcestruzzi fibrorinforzati.

Durabilità

Nelle recenti istruzioni *CNR_DT204_2006* è riportata una tabella relativa alle fibre in acciaio, nella quale si indica la possibilità di uso di queste in funzione delle classi di esposizione (in accordo con la norma *EN 206-1:2006 - Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity*) e della profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione (*UNI EN 12390-8*).

Gelo-disgelo

Riguardo alla resistenza al gelo dei compositi fibrorinforzati con fibre di acciaio, va detto che solo un aumento della percentuale dei vuoti d'aria è da ritenersi efficace: solo se si agisce in questo senso si possono ottenere calcestruzzi resistenti al gelo e questo vale anche per i calcestruzzi fibrorinforzati. Calcestruzzi rinforzati con fibre di acciaio, con un adeguato contenuto d'aria mostrano un'ottima resistenza a cicli di gelo-disgelo rispetto a calcestruzzi non rinforzati (Massazza e Coppetti, Italcementi, 1991). La norma da utilizzare, *ASTM C666-03 "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing"*, è applicabile anche a calcestruzzi non rinforzati. In ambito europeo si può utilizzare le norme *CEN/TR 15177:2006 "Testing the freeze-thaw resistance of concrete - Internal structural damage"*, *EN 13581-2003 "Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test method - Determination of loss of mass of hydrophobic impregnated concrete after freeze-thaw salt stress"* oppure la norma *UNI 7987-2002 "Calcestruzzo - Determinazione della resistenza al degrado per cicli di gelo e disgelo"*.

Carbonatazione

La presenza di fibre non sembra influenzare significativamente il fenomeno della carbonatazione dal momento che non sono stati rilevati incrementi della profondità del fronte di avanzamento della CO_2 .

La misurazione della profondità di carbonatazione del calcestruzzo fibrorinforzato viene condotta con la procedura di prova utilizzata per i calcestruzzi ordinari: *UNI 9944-1992 "Corrosione e protezione dell'armatura del calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo"*.

Corrosione delle fibre

Al fine di valutare gli effetti dell'esposizione del calcestruzzo fibrorinforzato ad ambienti aggressivi (ambiente saturo di sale, ioni aggressivi, etc.) occorre distinguere tra calcestruzzi integri e calcestruzzi pre-fessurati.

Nel primo caso la corrosione è limitata alle fibre in superficie con sola conseguenza estetica. Nel caso di provini fessurati, la diminuzione di resistenza è modesta e dipende dall'ampiezza e dalla profondità della fessura: per aperture di fessura maggiori di 0,1 mm, ma limitate in profondità, non ci sono conseguenze sull'efficacia strutturale (*ACI 544.1R – Fiber Reinforced Concrete*).

Esposizione al fuoco

Le affermazioni che seguono sono tratte integralmente dalle Istruzioni *CNR_DT204_2006*. Dall'esperienza finora acquisita sul comportamento al fuoco dei calcestruzzi rinforzati con fibre di acciaio si possono formulare le seguenti considerazioni:

- Basse percentuali di fibre (sino all'1%) non alterano significativamente la diffusività termica, che rimane dunque calcolabile sulla base dei dati disponibili per la matrice;
- Il danneggiamento provocato nel materiale da un ciclo termico spinto fino a 800 °C risulta prevalentemente correlato alla massima temperatura raggiunta nel ciclo e produce un effetto irreversibile sulla matrice. Tale comportamento, rilevato prevalentemente in presenza di limitate frazioni volumetriche di fibre metalliche, suggerisce, una volta ripristinata la temperatura ambiente, di apprezzare il degrado indotto attraverso la valutazione della resistenza residua;
- Al variare della temperatura massima di esposizione, la resistenza di prima fessurazione risulta tendenzialmente allineata con quella della matrice. Per temperature superiori ai 600 °C, le fibre migliorano il comportamento della matrice;
- Al variare della temperatura massima di esposizione, il modulo di elasticità dei calcestruzzi fibrorinforzati non risulta influenzato significativamente dalla presenza di limitate frazioni volumetriche ($\leq 1\%$) di fibre e, pertanto, può essere assimilato a quello della matrice;
- La presenza di fibre di polipropilene risulta efficace per limitare gli effetti di *spalling* distruttivo. In particolare, tali fibre sublimano parzialmente ad una temperatura di 170 °C lasciando cavità libere nella matrice. Una frazione volumetrica di fibre compresa tra lo 0.1% e lo 0.25% è in grado di mitigare significativamente o di eliminare il fenomeno.

Per la verifica degli effetti dell'esposizione al fuoco, esistono diversi procedimenti, alcuni dei quali riportati di seguito:

ISO 834 – 1994: *Fire-resistance tests - Elements of building construction*

BS 476 – 2004: *Fire tests on building materials and structures*

NORMATIVA

Di seguito sono riportate tutte le norme citate precedentemente. Esse riguardano le metodologie per testare il materiale, sia sotto l'aspetto meccanico, sia per tutti gli aspetti fisico-chimico. Sono riportate anche tutte le normative relative ai principi di progettazione basati sulle proprietà del materiale ed in funzione dell'assetto statico.

- ACI Committee - Report 544.1R – State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete
- ACI Committee - Report 544.2R – Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete
- ACI Committee – Report 544.4R – Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete
- ASTM C39 - Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- ASTM C157 - Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-cement Mortar and Concrete
- ASTM C418 - Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting
- ASTM C496 - Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- ASTM C512 - Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression
- ASTM C666 - Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing
- ASTM C779 - Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces
- ASTM C1018 - Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete
- ASTM C1116 - Standard Specification for Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete
- ASTM C1399 – Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber Reinforced Concrete
- ASTM C1550 - Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)
- ASTM C1579 - Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert)
- CRD-C 63-80 - Test Method for Abrasion-Erosion Resistance of Concrete (Underwater Method), U.S. Army Corps of Engineers
- AASHTO PP34-98 - Standard Practice for Estimating the Crack Tendency of Concrete
- EFNARC - European Specification for Sprayed Concrete
- EN 206-1 - Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity
- EN 12390-3 - Testing hardened concrete - Compressive strength of test specimens
- EN 12390-6 - Testing hardened concrete - Tensile splitting strength of test specimens
- EN 12390-8 - Testing hardened concrete - Depth of penetration of water under pressure
- EN 13581 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test method - Determination of loss of mass of hydrophobic impregnated concrete after freeze-thaw salt stress
- EN 13687-1 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods – Determination of thermal compatibility - Freeze-thaw cycling with de-icing salt immersion
- EN 14651 – Precast concrete products - Test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength
- CEN EN 1992-1-1 - Eurocode 2 – Design of concrete structures - Part 1-1: general rules and rules for buildings
- CEN/TR 15177 - Testing the freeze-thaw resistance of concrete - Internal structural damage
- RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – Bending test
- RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – σ - ε Design Method
- RILEM CPC-18 – Measurement of hardened concrete carbonation depth
- NF P18-409 – Beton avec Fibres Metalliques. Essai de flexion
- UNE 83-510 – Determination del Indice de Tenacidad y Resistencia a Primera Fisura
- NBN B 15-238 – Essai des bétons renforcés des fibres. Essai de Flexion sur éprouvettes prismatiques
- JCI-SF4 – Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete
- UNI 7087 - Calcestruzzo - Determinazione della resistenza al degrado per cicli di gelo e disgelo
- UNI 9944 - Corrosione e protezione dell'armatura del calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo
- UNI 11039-1 – Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio. Part. I: Definizioni, classificazione e designazione
- UNI 11039-2 – Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio. Part. II. Metodo di prova per la determinazione della resistenza di prima fessurazione e degli indici di duttilità
- UNI U73041440 - Progettazione, esecuzione e controllo degli elementi strutturali in calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio - Norme Tecniche per le Costruzioni – Decr. 14/09/05 – G.U. 23/09/05
- CNR_DT204_2006 - Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato
- ISO 834 – Fire resistance tests - Elements of building construction
- BS 476 - Fire tests on building materials and structures