

PRODOTTI E TECNOLOGIE PER RIPRISTINI AD ELEVATISSIME PRESTAZIONI

Ing. Stefano Maringoni

Introduzione

La necessità di riparare, di rinforzare per nuovi carichi o adeguare sismicamente strutture in calcestruzzo esistenti, già da diversi anni ha portato società particolarmente specializzate, a sviluppare prodotti cementizi speciali, con caratteristiche altamente performanti.

Questi prodotti, troppo genericamente definiti in passato “malte da riparazione, sono invece veri e propri micro-calcestruzzi che offrono prestazioni molto superiori a quelle di un calcestruzzo tradizionale in particolare per quanto concerne:

- Durabilità
- Resistenza a compressione
- Resistenza a flessione-trazione
- Duttilità
- Alta energia di frattura
- Speciale reologia dell'impasto messo in opera

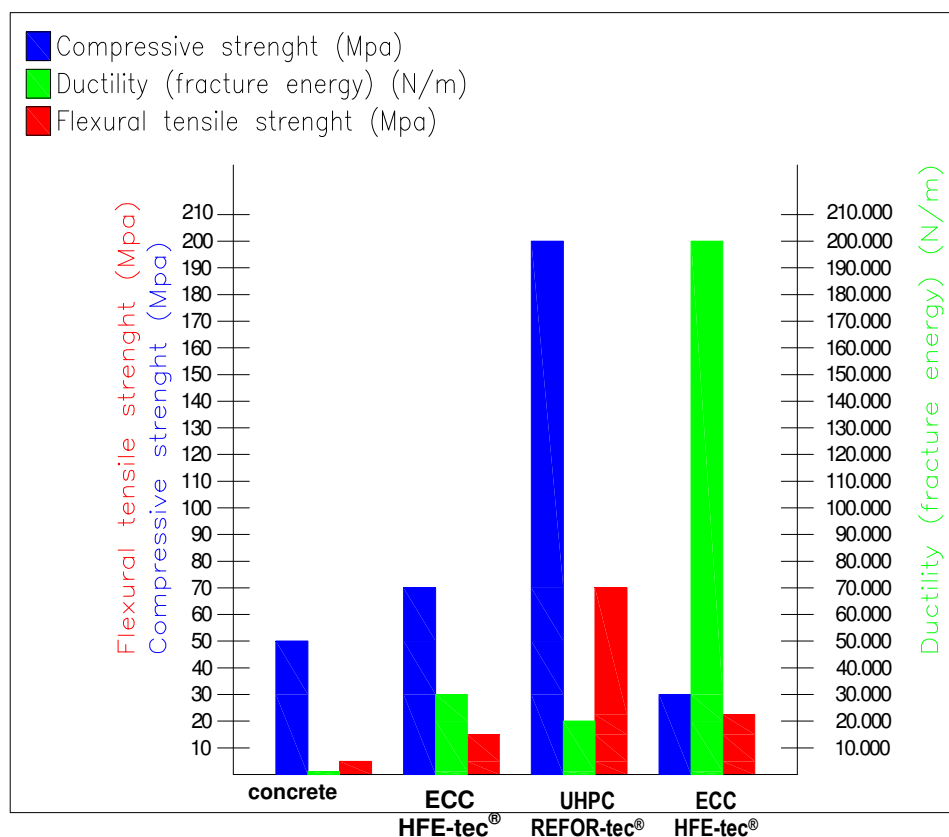
Per raggiungere questi obiettivi è stato necessario operare profondamente con ricerche innovative sulla matrice cementizia, sull'adesione matrice inerte, sui moduli elastici dei componenti di un mix design naturalmente più complesso.

Si parla allora di:

ECC: Engineered Cementitious Composites

UHPC: Ultra High Performance Concrete

Dall'analisi dell'istogramma sottostante si può capire come ci sia un attento progetto dietro la formulazione di un ECC o UHPC, al fine di massimizzare i parametri prestazionali che più interessano, scelti tra resistenza a compressione, a flessione-trazione, e l'elevata duttilità. Il tutto senza trascurare la reologia del materiale e l'attenta valutazione del suo modulo elastico.



1. La duttilità per l'integrità strutturale delle costruzioni

Se vogliamo affrontare il concetto DUTTILITÀ per le opere in c.a. e c.a.p. dobbiamo prima definire la duttilità di una struttura. Essa è caratterizzata dalla capacità della stessa di assorbire grandi deformazioni senza arrivare al collasso

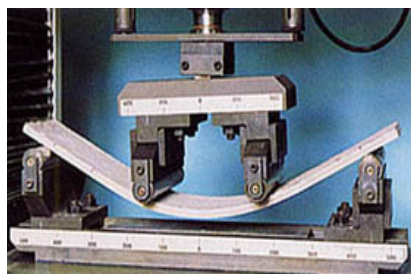
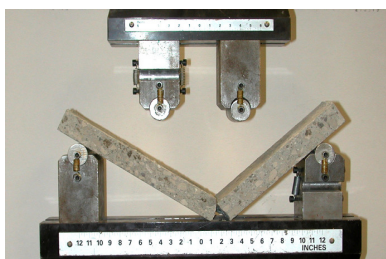
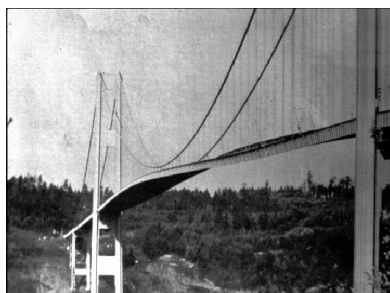
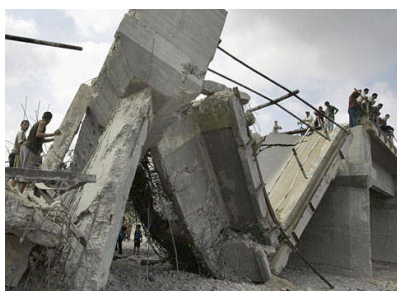
La duttilità di una struttura dipende dallo schema statico adottato e dal modo in cui è stata dimensionata, dalla presenza di giunti ecc.

Vi è anche la duttilità intrinseca del materiale. Essa è la capacità del materiale di deformarsi in una zona definita (localizzabile) senza fratturarsi.

E' proprio nell'ambito dei materiali da costruzione che, in questo momento, si stanno realizzando notevoli innovazioni che permettono attraverso nuove tecnologie, di portare il calcestruzzo, fin ora considerato fragile, a caratteristiche di alta duttilità

... DUTTILITÀ

▪ di una struttura



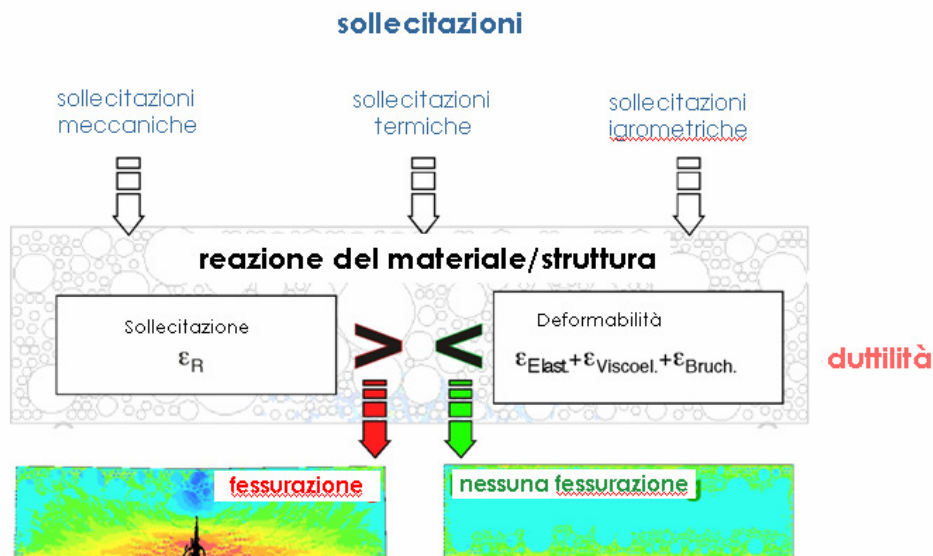
Essendo la DUTTILITA' (che è notoriamente l'opposto della FRAGILITA') indispensabile alle strutture, in particolare nelle aree sismiche, il Progettista via via abbandonerà i criteri basati sugli stati tensionali, che portano a cercare materiali con resistenze sempre più elevate (e di conseguenza spesso strutture comunque più rigide) passando al concetto che, in particolare nel caos di sollecitazioni sismiche, alla struttura può essere imposto uno stato di deformazione che la struttura stessa deve poter assorbire con il minor numero possibile di fessurazioni, evitando così il "collasso fragile".

HFE-tec® "High Fracture Energy Technologies" sono appunto nuovissime tecnologie volte alla applicazione di prodotti e sistemi DUTTILI.

2. Cause di fessurazione

Il calcestruzzo indurito può essere soggetto a diversi tipi di sollecitazioni:

- sollecitazione meccaniche: forze esterne che reagiscono sulla struttura e di cui si tiene ovviamente conto in fase progettuale;
- sollecitazioni esterne generate da deformazioni vincolate dovute a variazioni di temperatura o variazioni di umidità. Queste sollecitazioni spesso non sono prese in considerazione in fase progettuale. Quando insorgono, se la struttura è libera di deformarsi, non ci sono problemi. Se invece le deformazioni sono impedito da vincoli, nascono delle tensioni all'interno del materiale che possono portare alla nascita di fessurazioni talvolta anche passanti. Ad esempio nel caso ritiro da essiccazione il materiale nel tempo subisce una perdita di umidità superficiale e si genera un gradiente termico tra la parte interna del cls e la parte esterna. Il centro è soggetto a compressione e la parte esterna a trazione. Questo sbilanciamento causa la nascita di fessure. Nel caso di ritiro endogeno invece, il fenomeno si manifesta nei cls a bassissimo rapporto a/c contenenti microsilice. Nel processo di idratazione l'umidità interna diminuisce e causa una diminuzione di volume di tutto l'elemento. L'armatura in acciaio presente impedisce tale deformazione e quindi si generano delle fessure.



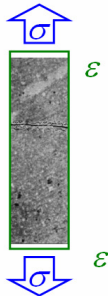
Quindi le sollecitazioni sul materiale sono di diverse tipologie: se il materiale offre una resistenza nei confronti di queste sollecitazioni attraverso una buona deformabilità (generata da contributi in termini di deformazione elastica, viscosa e duttilità) non nasce nessuna fessurazione, altrimenti se la reazione non è sufficiente a coprire le sollecitazioni (quindi scarsa deformabilità) ci sarà inevitabilmente la nascita di fessure.

3. comportamento a rottura dei materiali cementizi

Vi è nuovo modo, allora, di verificare il comportamento a rottura di questi nuovi materiali cementizi utilizzando due diverse metodologie per la prova a **trazione**:

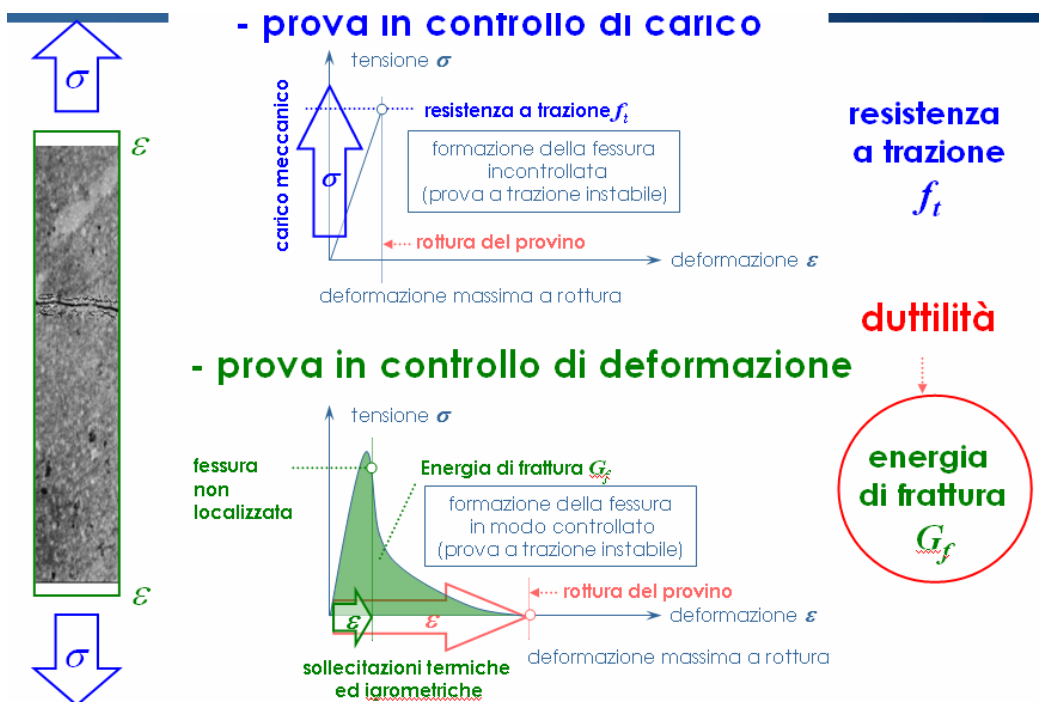
- in controllo di carico

- in controllo di deformazione



Prova in controllo di carico: aumento il carico sul provino fino alla rottura del materiale. In questo modo ricavo la resistenza a trazione con una formazione della fessura non controllata.

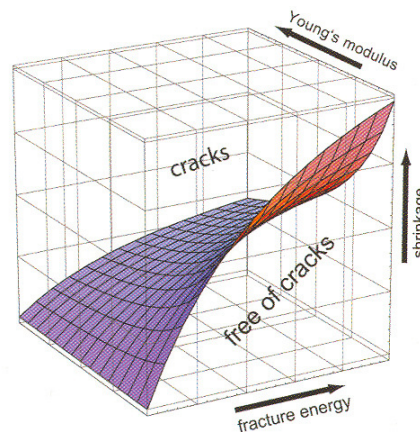
Prova in controllo di deformazione: regolo con la macchina di prova la velocità di deformazione e la mantengo costante, grazie a ciò avrò una formazione della fessura controllata che mi permette di analizzare l'energia di frattura del materiale. Questo tipo di prova è importante perché quando i materiali sono sottoposti a sollecitazioni dovute a variazioni di temperatura e di umidità si comportano come nel caso di una prova a controllo di deformazione. Quindi si intuisce che il parametro chiave sia l'energia di frattura.



4. materiali cementizi duttili e meccanismi di formazione delle fessure: il rapporto fra duttilità ed energia di frattura

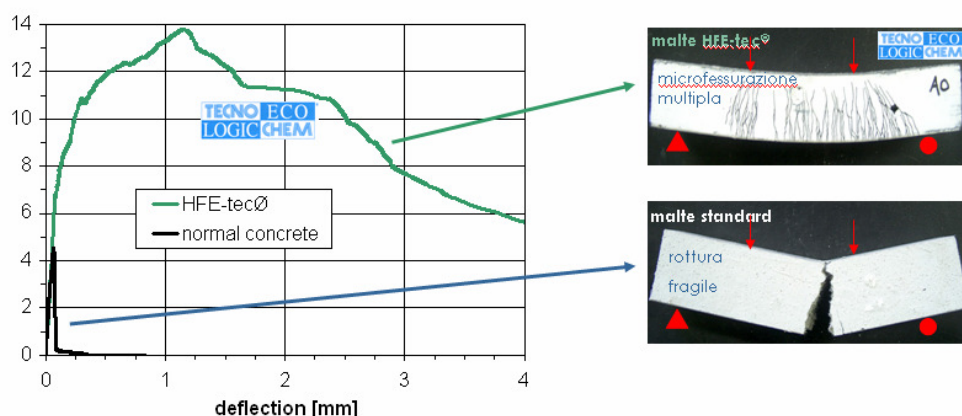
Impegnate Ricerche Accademiche sono state condotte, per decenni, presso Istituti Universitari leader. I risultati conseguiti consentono una conoscenza profonda dei meccanismi di formazione delle fessure anche in condizioni di estrema complessità.

I parametri che maggiormente influenzano la formazione delle fessure conseguenti a cambiamenti di volume, quali il ritiro, sono raffigurati in un diagramma con parametri tridimensionali.



Con speciali formulati il Modulo di Young ed il comportamento al ritiro di un materiale, possono oggi esser modificati entro notevoli valori. L'energia di frattura può essere incrementata di molte volte con adatte formulazioni che consentono l'utilizzo e la massima collaborazione strutturale di fibre ad altissimo modulo. L'influenza del valore dell'energia di frattura sul comportamento delle fessure diviene evidente dai risultati delle prove meccaniche di rottura e di deformazione sotto carico. I formulati HFE-tec[®] consentono eccezionali valori di frattura e duttilità.

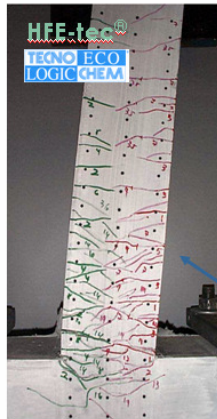
Esempio 1: comportamento a flessotrazione malta di ripristino HFE-tec pav 360



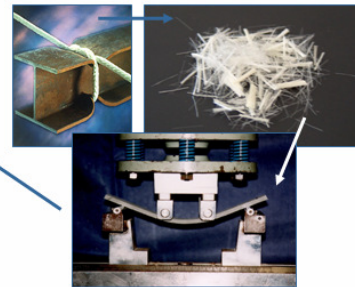
Esempio: gli stress sismici

I terremoti portano a deformazione tali da causare spesso la formazione di fessure nelle strutture in calcestruzzo. Può essere assicurata l'integrità strutturale delle costruzioni se si creano elementi o materiali capaci di assorbire parte di questa energia di deformazione, per esempio attraverso la formazione di microfessure senza collasso.

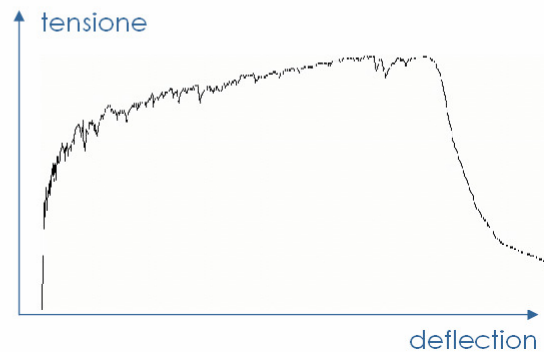
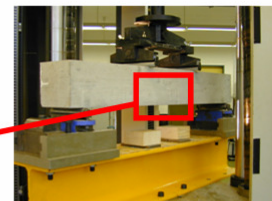
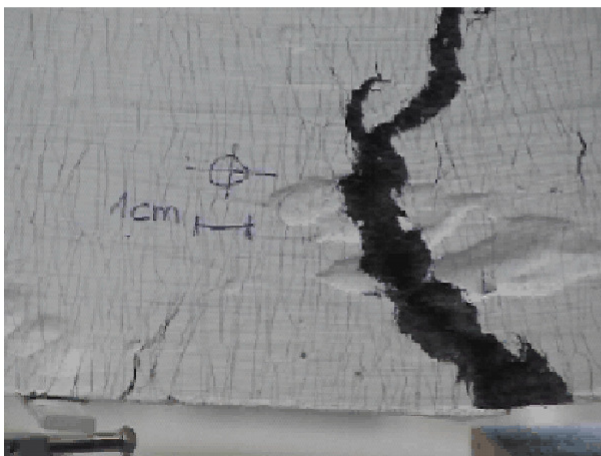
es. **Utilizzo:** nodi strutturali per strutture antisismiche



estrema deformabilità
indotta dall'interazione
matrice - fibre sintetiche
ad altissimo modulo



Esempio 2: comportamento a flessotrazione: malta HFE-tec SHCC1



HFE-tec® sono tecnologie a vasto spettro applicativo, in particolare dovunque devono essere assorbite grosse deformazioni, come nei casi conseguenti a sollecitazioni sismiche, senza cedimenti strutturali e/o dovunque la formazione di fessurazioni deve essere strutturalmente controllata. Nelle strutture sismicamente resistenti HFE-tec® possono essere perfettamente combinate con le armature d'acciaio.

5. case history: getto di solette duttili Autostrada A22

Uno dei casi più importanti di prima applicazione delle tecnologie HFE-tec® è stata la rimozione di giunti su impalcati dell'autostrada del Brennero con solette in cls speciale ad alta duttilità.

In questo caso la deformazione non è più localizzata in un punto, ma distribuita su 2,5 metri di lunghezza.

Si è ottenuta l'eliminazione di un punto di bassissima durabilità. Il rapido degrado del giunto porta l'accesso dei Sali decongelanti alle selle d'appoggio delle travi ed al successivo percolamento sui pilastri con attacchi da cloruri alle armature lente.



Oggetto:
Viadotto San Maurizio

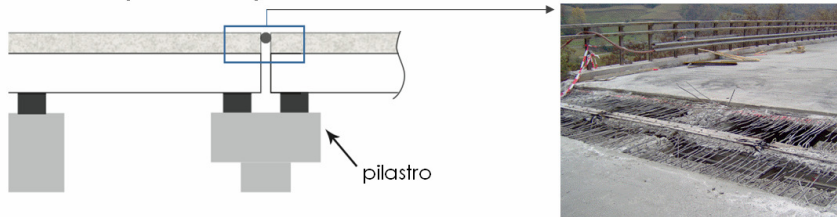
Località:
Chiusa

Ripristino:
15 solette di collegamento

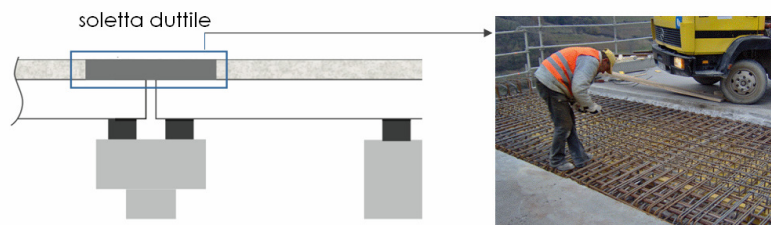
Quantità:
150 metri cubi

Materiale:
Calcestruzzo fibrorinforzato
a basso modulo elastico
ed elevata duttilità

Situazione prima del ripristino



Ripristino del giunto tramite solette duttili





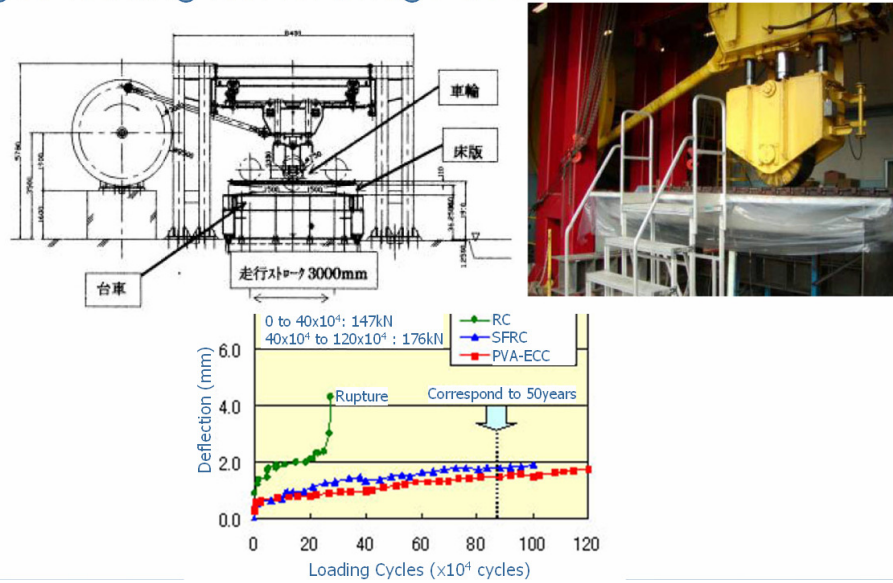
caratteristiche del calcestruzzo messo in opera:

- reologia: reoplastica (pendenze)
- tenuta di lavorabilità: su un periodo di 3.5 h
- pedonabilità: a partire da 10h
- modulo Elastico: < 25 GPa
- classe di resistenza: C45/55
- energia di frattura: ca. 12'500 N/m
- densità: < 2180 g/l
- resistenza al pull out: 25% superiore rispetto al cls standard
- ritiro igrometrico < 0.5%.
- durabilità elevata (rapporto a/c < 0.33)

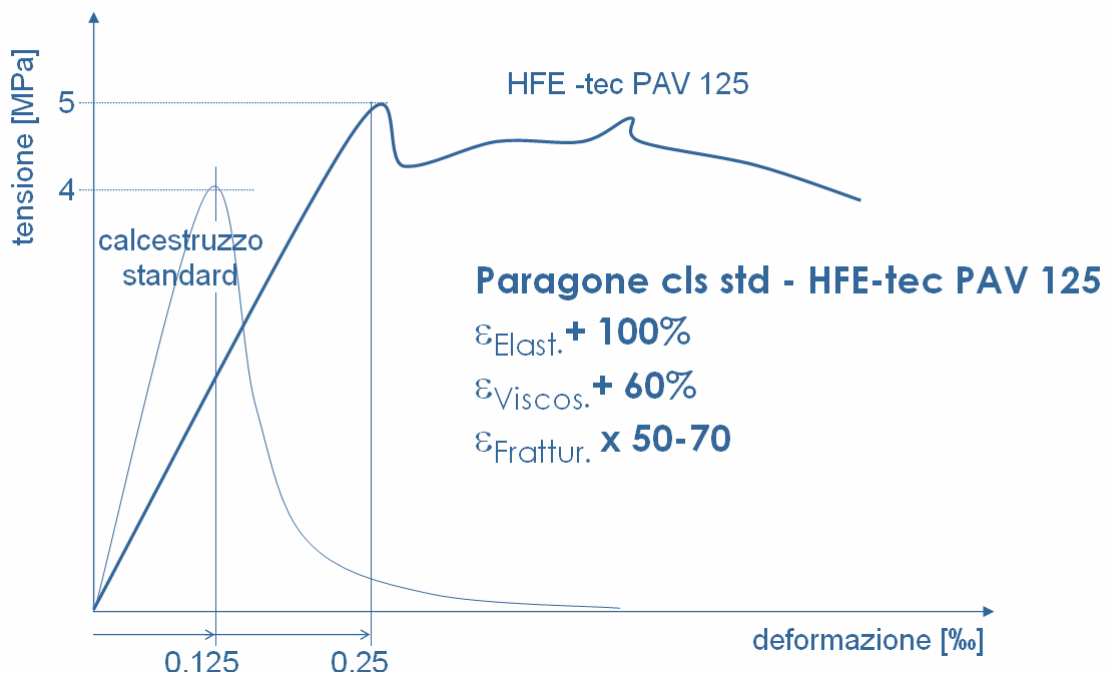
nei test a fatica che hanno preceduto queste applicazioni sono state messe a confronto solette in cls armato, con solette sempre armate, ma in cls fibrorinforzato con fibre metalliche e fibre sintetiche ad altissimo modulo elastico.

Si evidenzia come anche a fatica il comportamento ottimale sia quello delle fibre ad alto modulo elastico, poichè hanno un effetto di redistribuzione del danneggiamento del materiale estremamente più elevato.

Fatigue loading test for bridge deck



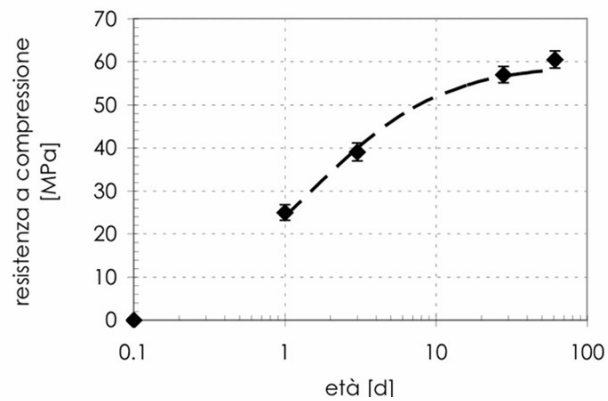
comportamento a trazione



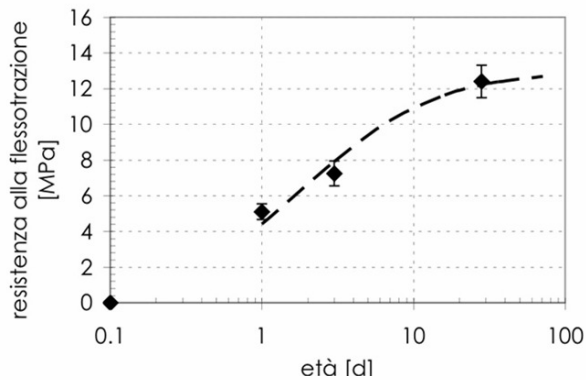
Comportamento a trazione

Rispetto ad un cls standard, l'HFE-tec[®] ha una deformazione elastica superiore del 100%, una deformazione viscosa superiore del 60%.

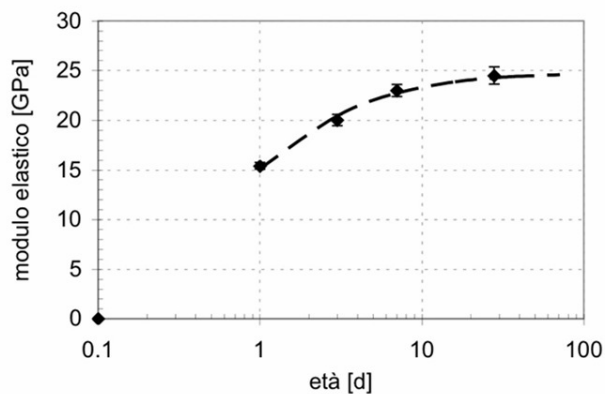
Caratteristiche del calcestruzzo messo in opera
-> evoluzione della resistenza a compressione



Caratteristiche del calcestruzzo messo in opera
-> evoluzione della resistenza a flessotrazione



Caratteristiche del calcestruzzo messo in opera
-> evoluzione del modulo elastico E



LA DURABILITA' DELLE NUOVE STRUTTURE IN C.A. E DI QUELLE RESTAURATE (IN ACCORDO ALLA NORMA EUROPEA EN 206-1, AL DM DEL 14 SETTEMBRE 2005 ED ALL'ORDINANZA 3274 SULLA RICLASSIFICAZIONE SISMICA DEL TERRITORIO ITALIANO), **RICHIEDONO MODELLI DI GESTIONE DEL PROGETTO E DEL CANTIERE BASATI SULLE INNOVAZIONI DEI MATERIALI E DELLE LORO APPLICAZIONI NELLE STRUTTURE IN C.A.**

6. CASE HISTORY: ADEGUAMENTO SISMICO DELL'OSPEDALE COTUGNO DI BARI

I vantaggi nell'applicazione di materiali cementizi fibro-rinforzati nell'adeguamento sismico delle strutture esistenti sono essenzialmente:

- Duttilità (è doveroso ricordare che la duttilità del materiale non implica necessariamente la duttilità della struttura realizzata)
- Resistenza ai carichi ciclici (es: azione sismica)
- Elevate resistenze con bassi spessori applicativi (riduzione delle masse sospese)
- Resistenza a trazione senza necessità di introdurre armatura aggiunta
- Elevata adesione al supporto esistente (si riduce o elimina la necessità di monconature o di resine per le riprese di getto)

Di seguito verranno presentati alcuni esempi applicativi di rinforzi strutturali con UHPC: si tratta di applicazioni in cantiere o di sperimentazioni in scala reale effettuate presso le Università di Bergamo e Brescia.

Per realizzare l'adeguamento sismico dell'Ospedale D. Cotugno di Bari (studio SGM di Barletta) è stato redatto un progetto che prevede la realizzazione di setti in c.a. destinati a incassare le azioni orizzontali dovute al sisma.

Una essenziale condizione da soddisfare è il trasferimento degli sforzi dal solaio ai setti tramite una cappa che renda meccanicamente solidale il solaio ai setti. La cappa deve essere in grado di assorbire sollecitazioni cicliche a compressione, trazione e taglio riportandole sui setti verticali.

L'adeguamento sismico degli impalcati è stato ottenuto grazie a un formulato cementizio tricomponente che unisce la reologia autolivellante ad elevati valori fisico-meccanici e di duttilità.

I dati fisico- meccanici salienti del betoncino sono:

• Resistenza alla compressione	130 MPa
• Resistenza alla trazione diretta	8,5 Mpa
• Resistenza alla flessotrazione	32 Mpa
• Resistenza al taglio	16 Mpa
• Modulo Elastico	38 Gpa
• Energia di frattura	32.500 N/m

(* valori ricavati da schede tecniche REFOR-tec[®] GF5 di Tecnochem Italiana Spa)

I vantaggi rispetto alla soluzione tradizionale costituita da una cappa armata in CLS armato sono:

- Basso spessore applicativo (consegue un ridotto incremento dei carichi sospesi e una limitata riduzione della luce libera interpiano)
- Adesione al supporto senza necessità di connettori o resine
- Nessuna necessità di rete di armatura
- Elevata duttilità e resistenza a sollecitazioni cicliche
- Incremento della portanza unita a una riduzione della freccia dell'impalcato

Prima dell'applicazione si è reso necessario eseguire uno studio preliminare:

1. Verifica di adesione al supporto esistente
2. Verifica di integrità del diaframma

Verifica di adesione al supporto esistente

Questa verifica è stata eseguita tramite una campionatura in sito, con lo scopo di verificare come le diverse preparazioni del supporto potessero influenzare i valori di adesione.

Sono state eseguite prove a strappo su supporto:

- Solo idropulito
- Idropulito e sabbiato
- Con connettori metallici
- Con radici in UHPC, ricavate forando il supporto

I risultati mostrano valori di adesione più elevati nel caso di presenza di connettori o radici in UHPC. In tutti i casi comunque la rottura si è avuta all'interno del supporto, mentre l'interfaccia tra UHPC e CLS preesistente rimane integra. Ciò mostra come l'adesione del microcalcestruzzo sia garantita a prescindere dal tipo di preparazione del supporto, non è necessaria sabbiatura o scarifica.

Nel caso di supporti molto degradati la radice in UHPC può aumentare la resistenza finale a strappo, scongiurando il rischio di delaminazione.

Verifica di integrità del diaframma

È stata eseguita una verifica della capacità resistente del diaframma in UHPC in seguito alle tensioni indotte dal ritiro e dalla deformazione dell'impalcato sotto i carichi accidentali.

A tal fine si è eseguita una modellazione numerica che tenesse conto:

- della deformazione del solaio sotto i carichi accidentali applicati dopo il rinforzo
- del ritiro endogeno del materiale

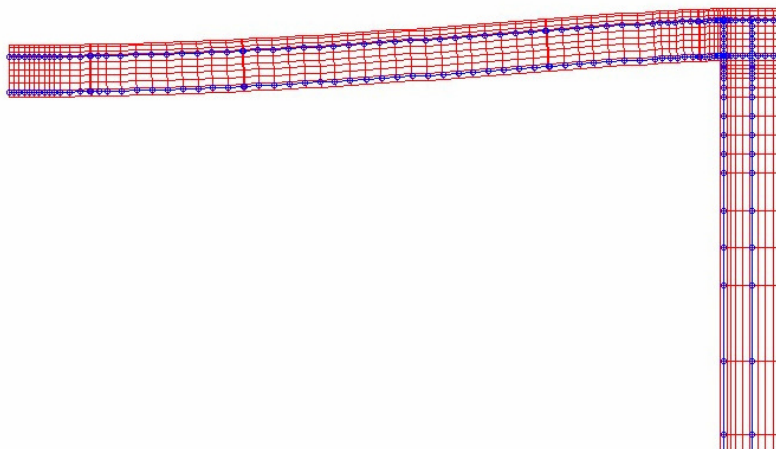


Fig.7 Magliatura deformata dopo 70 giorni di carico

I risultati:

Verifica a trazione: La cappa si mantiene integra e garantisce una resistenza residua idonea a fronteggiare le sollecitazioni sismiche.

Verifica di adesione: Sollecitazioni all'interfaccia limitate, basso rischio di delaminazione

L'applicazione



Il supporto è stato preparato tramite una scarifica, avente lo scopo di regolarizzare il piano e garantire un risparmio di materiale, seguita da un'aspirazione delle polveri e un idrolavaggio.

Sul perimetro sono stati inseriti nei setti previa foratura e rimozione delle polveri, apposite barre d'acciaio ancorate con resina.

La miscelazione è avvenuta grazie a un miscelatore ad asse verticale inserendo nell'ordine: polvere, acqua, fibre, additivi.

L'applicazione è avvenuta effettuando il trasporto mediante carriole e stendendo il miscelato con una staggia. Immediata applicazione di curing superficiale.

7. RINFORZO A FLESSIONE DI TRAVI IN CLS GRAZIE ALL'APPLICAZIONE DI UHPC

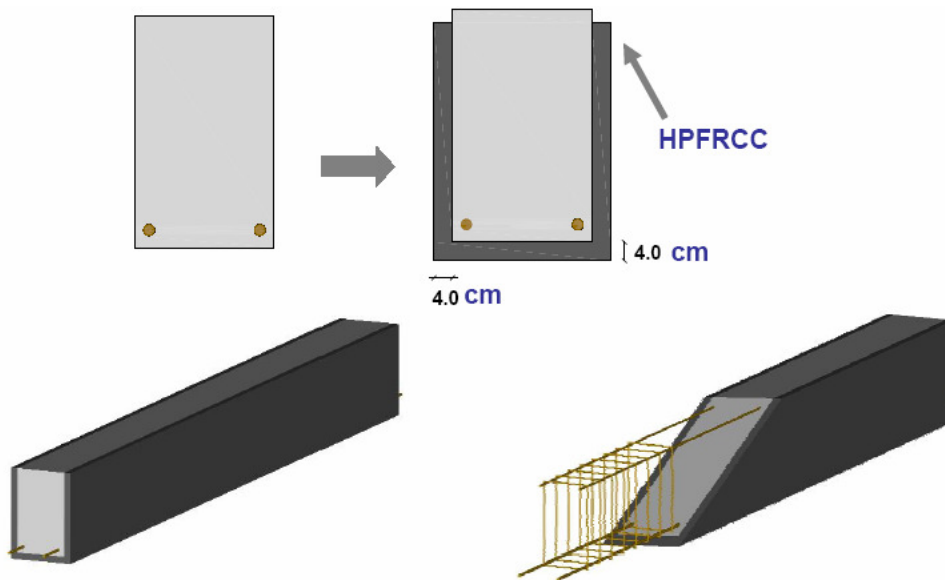
La ricerca di seguito illustrata è stata curata dal prof. A. Meda presso le Università di Bergamo e Brescia.

Obiettivo della ricerca:

valutare l'incremento della resistenza a flessione di travi in calcestruzzo rinforzate con un rivestimento sp. 40 mm di UHPC.

Sono state realizzate tre travi a scala reale, sezione 30 cm x 50 cm, luce 435 cm

- La prima con armatura tradizionale, 2F16
- La seconda senza barre di armatura, ma con 4 cm di UHPC
- La terza con armatura tradizionale, 2F16 + 4 cm di UHPC



I dati fisico- meccanici salienti del betoncino sono:

• Resistenza alla compressione	182 MPa
• Resistenza alla trazione diretta	12 Mpa
• Resistenza alla flessotrazione	50 Mpa
• Modulo Elastico	44 Gpa
• Energia di frattura	65.000 N/m

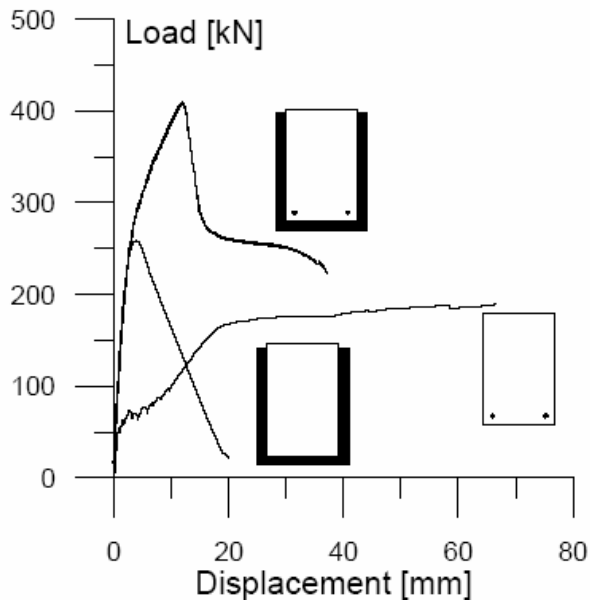
(* valori ricavati da schede tecniche REFOR-tec[®] GF3 di Tecnochem Italiana Spa)

I risultati sperimentali

L'UHPC ha mostrato:

- Elevata adesione al supporto (solo sabbiato)
- Ottima colabilità all'interno del cassero
- Assenza di fibre in superficie, superficie liscia
- Si evita il problema della resistenza al calore delle resine epossidiche (v. rinforzo con fibre in carbonio)

Di seguito un diagramma che mostra le curve freccia/carico per le diverse soluzioni testate



Il rinforzo con microcalcestruzzo ha garantito:

- Incremento del carico massimo (+100%)
- Riduzione della freccia in esercizio di circa 12 volte

Il risultato più impressionante è stato proprio la riduzione della freccia, risultato dovuto a una sorta di effetto “precompressione” fornito dall’UHPC.

E’ importante ricordare che un intervento simile consente di ottenere, oltre all’incremento di resistenza della struttura, un incremento della durabilità della stessa, in quanto l’UHPC è un eccellente strato protettivo per il calcestruzzo e le barre d’armatura sottostanti.

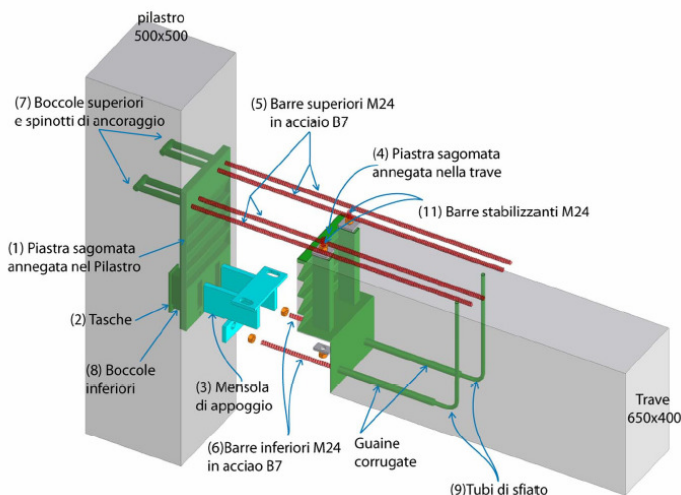
Gli sviluppi futuri

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, la sperimentazione sta proseguendo su travi già fessurate, e i primi risultati sono decisamente promettenti.

Per quanto riguarda lo sviluppo dell’UHPC è allo studio una variante applicabile a spruzzo che potrebbe ampliare ulteriormente i campi applicativi.

8. STUDIO SPERIMENTALE DI UN NODO TRAVE PILASTRO SISMO- RESISTENTE PER STRUTTURE PREFABBRICATE

La ricerca di seguito illustrata è stata curata dai prof. G. Metelli, P. Riva, C. Beschi, presso le Università di Bergamo e Brescia, in collaborazione con l’azienda Edilmatic srl



Obiettivo della ricerca

Attualmente in Italia le strutture prefabbricate sono realizzate con semplici schemi strutturali, costituiti da travi appoggiate o incernierate ai pilastri

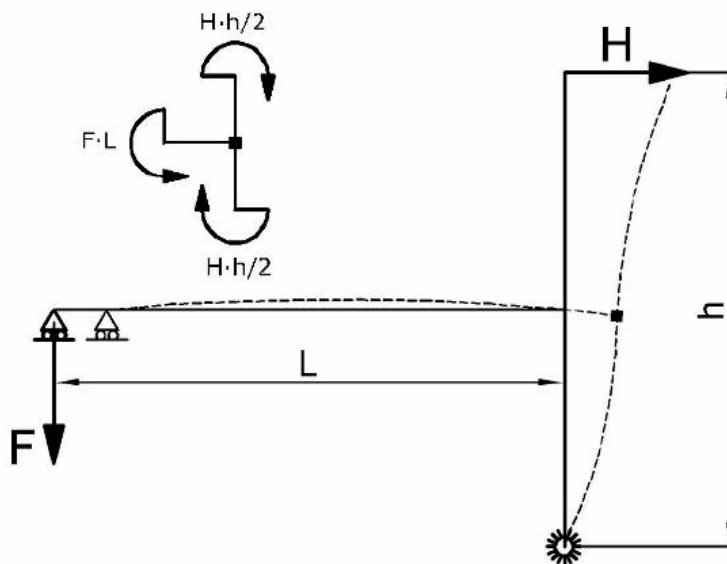
Per ottenere strutture sismo resistenti risulta inevitabile l'adozione di membranature di grandi dimensioni, sia per ridurre la deformabilità delle travi, sia per rendere la struttura resistente alle sollecitazioni orizzontali.

Scopo della ricerca è studiare collegamenti che garantiscano l'incastro trave-pilastro, in grado di permettere quindi la realizzazione di telai sismo-resistenti, senza perdere i vantaggi tipici della prefabbricazione.

Descrizione della prova

Sul pilastro e sulla trave si trovano piastre di acciaio sagomate al fine di aumentare l'incastro a taglio. Apposite barre d'armatura vengono estratte da guaine metalliche corrugate predisposte e fissate al pilastro. Un UHPC viene colato all'interfaccia tra pilastro e trave, garantendo anche l'ancoraggio delle barre inferiori.

La prova avviene imprimendo uno spostamento ciclico crescente in sommità del pilastro, fino alla rottura del nodo.



I risultati sperimentali

La rottura avviene al 23° ciclo, in corrispondenza di uno spostamento di 91 mm rispetto alla posizione iniziale (drift = 2,5%).

L'analisi dei primi dieci cicli di sollecitazione ha mostrato un comportamento stabile del giunto con una limitata perdita di rigidezza.

I valori delle rigidezze teoriche sono confrontabili con i valori sperimentali, con uno scarto che si mantiene sempre tra il 3% e il 10%

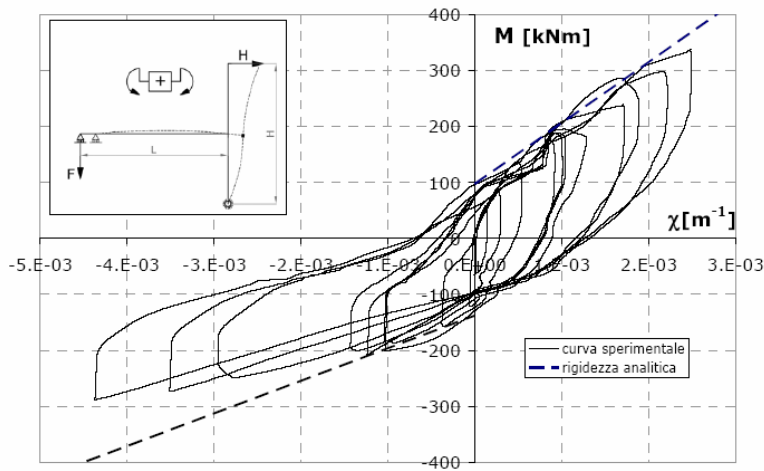


Figura 19: Diagramma Momento M – Curvatura χ primi dieci cicli di carico applicati al giunto.

La sperimentazione ha dimostrato:

- Grande rapidità esecutiva del nodo.
- Fino a spostamenti in sommità di circa 70 mm (drift=2%), comportamento stabile del nodo, con valori di dissipazione energetica elevati.
- In caso di sollecitazioni sismiche di media intensità il cuscinetto di microcalcestruzzo presente tra le piastre in acciaio sagomate consente di localizzare il danno, prevenendo il danneggiamento della trave e del pilastro (facile riparazione)

Il microcalcestruzzo ha garantito:

- Un corretto riempimento di tutte le cavità, nonostante la colatura in spazi estremamente ridotti.
- Un corretto ancoraggio delle barre di armatura.
- Grande resistenza ai carichi ciclici.
- Ottima resistenza a taglio sull'interfaccia trave-pilastro.

Bibliografia di riferimento:

Martinola G., Sadouki H & Wittmann F.H. 2001. Numerical Model for Minimizing the Risk of Damage in a Repair System. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol 13 No.2*: 121-129

Kim, Y Y., Fischer, G. & Li., V.C. 2004. Performance of Bridge Deck Link Slabs Designed with Ductile Engineered Cementitious Composites. *ACI Structural Journal (Technical Paper Title No. 101-S78)*: 792-801

Li, V.C. 2002. Reflections on the Research and Development of Engineered Cementitious Composites (ECC). *In the Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber*

Walraven, J. 1999. The evolution of concrete. *Structural concrete 1*.

Balugaru, P. & Shah, S.P. 1992. *Fiber Reinforced Cement, Composites*. McGraw-Hill

Prisco, R., Felicetti, R. & Plizzari, G.A. Eds. 2004. *Proceedings of the 6th RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes (FRC)*. RILEM PRO 39, Bagnaux (France) 1514 pp

Sorelli, L., A. Meda & G.A. Plizzari. 2006. Steel fiber concrete slabs on grade: a structural matter. *ACI Structural Journal 103 (4) 2006*

CNR DT 204/2006. 2006 *Guidelines for the Design, Construction and Production Control of Fibre Reinforced Concrete Structures*. National Research Council of Italy

Minelli, F. & Plizzari, G.A. 2006. Steel Fibers as Shear reinforcement for Beams. *Proceedings of the second Fib Congress, Naples, Italy, 5-8 June, 2006*: abstract on page 282-283, full length paper available on accompanied CD, pp. 12

Abrishami, H. H. & Mitchell, D. 1997. Influence of Steel Fibers on Tension Stiffening, *ACI Structural Journal, Vol 94, No 6*: 769-776

UNI 11039. 2003. *Steel Fiber Reinforced Concrete- Part I: definitions, Classification, Specification and Conformity- Part II: Test Method for Measuring First Crack Strenght and Ductility Indexes*. Italian Board for Standardization