

# SULLA CARATTERIZZAZIONE DEL COMPORTAMENTO FLESSIONALE POST-PICCO DI CALCESTRUZZI RINFORZATI CON FIBRE DI ACCIAIO

S. Cangiano<sup>1</sup>, R. Cucitore<sup>1</sup>, G.A. Plizzari<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CTG-Italcementi Group, via G. Camozzi 124, 24121 Bergamo.

<sup>2</sup>Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Brescia, via Branze 28, 25123 Brescia.  
s.cangiano@itcgr.net, plizzari@ing.unibs.it

## Abstract

*Fiber reinforced concrete is being increasingly used in pavements, off-shore platforms, water retaining structures, bridges, etc. The use of fibers should be even more effective in high strength concrete which is characterized by a particularly brittle post-peak behavior. Unfortunately, the available Standards to evaluate the performance of fiber reinforced concrete do not provide parameters useful for design in terms of post-peak stresses and ductility. In the present work, a critical analysis of the principal Standards proposed worldwide is presented. The main drawbacks concern the determination of the first crack point and the post-cracking stresses that are not evaluated within ranges of practical interest. The evidenced limits of the existing Standards are considered within the Italian Board for Standardization (UNI) that is preparing a new code for Italy.*

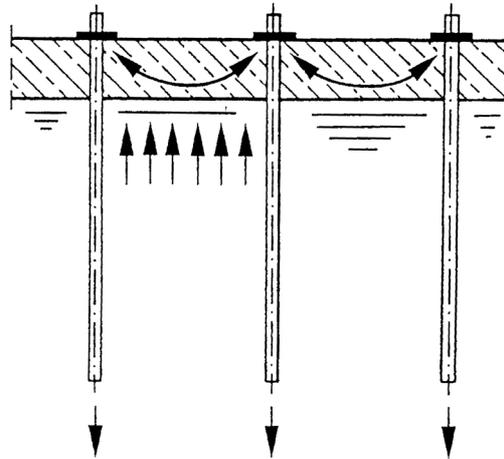
## Introduzione

Negli ultimi anni i calcestruzzi rinforzati con fibre di acciaio (Steel Fiber Reinforced Concrete - SFRC) hanno riscosso un notevole interesse per le caratteristiche prestazionali che possono manifestare in regime di post-fessurazione.

Il calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio è diffusamente impiegato in applicazioni per le quali la presenza di un rinforzo continuo non è essenziale per la sicurezza e l'integrità della struttura (pavimentazioni industriali, etc.). Accanto a tali applicazioni, esistono tuttavia realizzazioni per le quali le fibre di acciaio sono state impiegate come unico elemento di rinforzo in strutture sottoposte a carichi flessionali [1]. Esempi di tale applicazioni si trovano nel parcheggio dell'aeroporto di Heathrow a Londra, realizzato con piastre quadrate (1.07x1.07x0.1 m) e appoggiate sui quattro lati [2], o nella platea di fondazione di Potsdamer Platz a Berlino [3] (Fig. 1).

Il notevole interesse per il rinforzo del calcestruzzo mediante fibre di acciaio risulta giustificato non solo dalle reali o potenziali applicazioni sopra delineate, ma anche in considerazione della sinergia derivante dall'impiego congiunto di fibre di acciaio e calcestruzzo ad alta resistenza (HSC). Infatti le caratteristiche che il rinforzo fibroso

conferisce al calcestruzzo sono tali da compensare in parte o del tutto la fragilità tipica del calcestruzzo (Fig. 2) che si accentua per quello ad alta ed altissima resistenza, consentendo inoltre un notevole miglioramento delle prestazioni del materiale come, ad esempio, il suo comportamento a fatica [4].



*Figura 1.*

*Meccanismi resistenti nella piastra di fondazione in SFRC realizzata a Berlino [3].*

Anche nel campo della prefabbricazione pesante, dove si fa costante uso di calcestruzzo HSC, il rinforzo discontinuo mediante fibre di acciaio potrebbe trovare un'interessante applicazione in sostituzione, almeno parziale, dell'armatura ordinaria grazie ai sensibili vantaggi economici derivanti dalla riduzione dei tempi di produzione [5].

In tale contesto il quadro normativo internazionale non sembra offrire metodi di valutazione oggettivi e comunque in grado di discriminare correttamente i differenti livelli prestazionali che gli SFRC possono manifestare in regime di post-fessurazione in termini di resistenza residua e di duttilità.

In effetti le modalità di prova previste dalle differenti norme [6,7,8,9,10,11,12,13] sono state frequentemente oggetto di discussione [14], tanto che la commissione TC 162-TDF della RILEM, recependo le istanze emerse da più parti circa la necessità di disporre di metodi di prova in grado di fornire risultati utili in sede di progettazione strutturale, ha recentemente definito delle nuove linee guida [15].

Un altro aspetto da prendere in considerazione è l'assenza negli attuali testi normativi di una corretta classificazione delle prestazioni degli SFRC; tale lacuna, accanto alla assenza di metodi di prova in grado di fornire strumenti di progetto, costituisce una forte limitazione all'utilizzo degli SFRC in campo strutturale. Considerando che il beneficio delle fibre si manifesta a partire dalla fessurazione della matrice cementizia attraverso un'azione di "crack bridging" [16] (Fig. 3), la completa e corretta valutazione degli SFRC richiede l'impiego di metodi di indagine e di analisi dei risultati basati sulla Meccanica della Frattura Non Lineare.

Nel presente lavoro viene presentata una analisi critica delle norme internazionali più diffuse; dai risultati di tale analisi è emersa l'esigenza di definire una norma italiana che allo stato attuale, dopo approfondite discussioni, può essere considerata prossima all'approvazione definitiva. Il metodo proposto è stato confrontato con gli altri metodi previsti dalle normative internazionali vigenti e verificato attraverso un'estesa campagna di prove su calcestruzzi caratterizzati da differenti dosaggi e tipologie di fibre e da differenti rapporti di miscela (dosaggio e tipo di cemento, rapporto a/c, diametro massimo dell'aggregato), i cui risultati saranno oggetto di una prossima pubblicazione [17].

## Metodo di prova e geometria dei provini

Le principali normative hanno cercato di valutare la capacità del calcestruzzo fibrorinforzato di dissipare energia, caratteristica che consente al materiale di migliorare il comportamento a frattura, la resistenza all'impatto e la resistenza a fatica. Tale capacità può essere determinata attraverso prove di compressione, di trazione diretta e di flessione. Quest'ultima è quella normalmente adottata in quanto è di facile esecuzione ed è rappresentativa di molte situazioni pratiche.

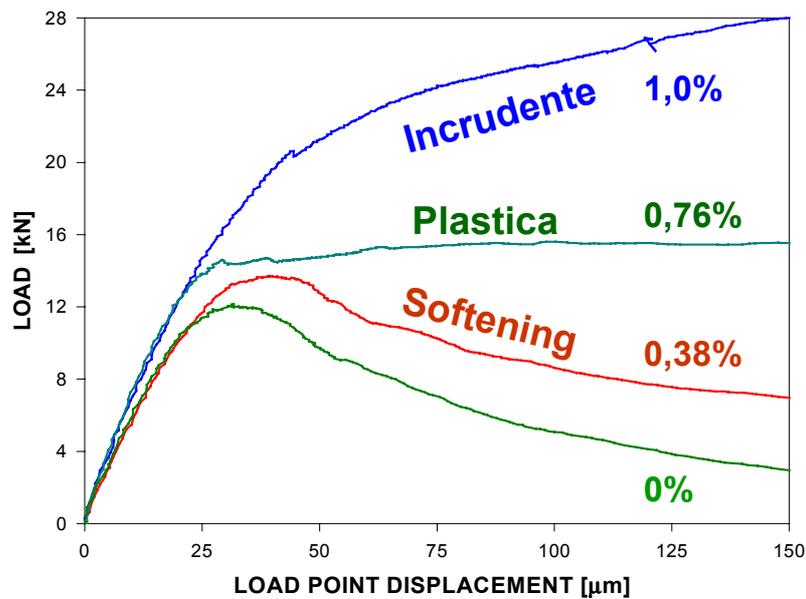


Figura 2

Curve carico-spostamento verticale ottenute da prove di flessione su travi di SFRC a differente dosaggio volumetrico di fibre.

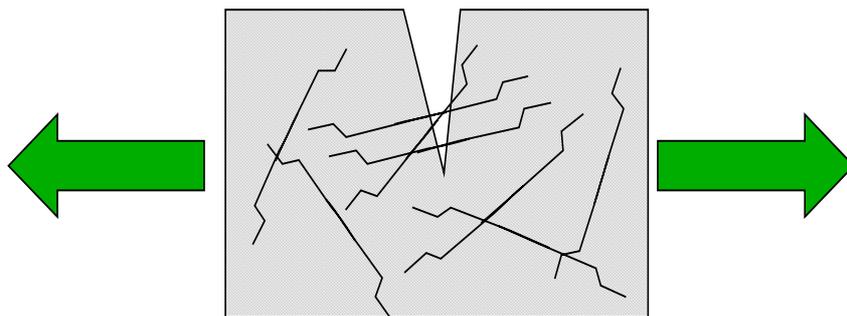


Figura 3

Schema di fessura in un SFRC.

Tra le prove di flessione, alcune normative hanno adottato lo schema di carico su tre punti, mentre altre hanno optato per lo schema su quattro punti.

Le dimensioni previste per i provini dalle principali normative e raccomandazioni non sono molto diverse tra di loro; ciò è evidenziato in Tabella 1, nella quale sono anche riportate le modalità di carico, le grandezze rilevate durante la prova ed i parametri considerati per la classificazione del materiale.

Tabella 1

Geometria dei provini, grandezze rilevate e risultati forniti dalle prove previste dalle principali normative e raccomandazioni per il calcestruzzo fibrorinforzato.

| Standard                                  | Specimen and loading                                                          | Specimen dimensions                                                                      | Parameters monitored                                                                                                  | Measurements                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ASTM C 10 18-92                           | <input type="checkbox"/> Beam<br><input type="checkbox"/> Third-point loading | 100x100x350 mm preferred (Variations permitted)                                          | <input type="checkbox"/> Load<br><input type="checkbox"/> Net deflection at midspan                                   | <input type="checkbox"/> First crack strength and deflection<br><input type="checkbox"/> Toughness Index I5, I10, I20 (Ratio of energy absorbed up to $n\delta_r$ and that absorbed energy up to $\delta_r$ (n=3; 5,5; 10,5).<br><input type="checkbox"/> Residual strength factor(s)                                                                                            |
| Norma Española UNE 83-510-89              | <input type="checkbox"/> Beam<br><input type="checkbox"/> Third-point loading | $d/b < 1.5$<br>$l = 3d$<br>$s > 3d + 50$ mm                                              | <input type="checkbox"/> Load<br><input type="checkbox"/> Deflection at midspan                                       | <input type="checkbox"/> First crack strength<br><input type="checkbox"/> Energy absorbed until the deflection of $l/150$<br><input type="checkbox"/> Ratio of energy absorbed up to deflection of $15.5\delta_r$ to that up to $\delta_r$ .                                                                                                                                     |
| Normalisation Française P 18-409          | <input type="checkbox"/> Beam<br><input type="checkbox"/> Third-point loading | $b = d = 140$ mm<br>$l = 420$ mm<br>$s = 560$ mm                                         | <input type="checkbox"/> Load<br><input type="checkbox"/> Deflection at midspan (avg)                                 | <input type="checkbox"/> First crack load $P_f$<br><input type="checkbox"/> Ratio of load at deflection $\delta$ to load $P_f$ ( $\delta = 0,7; 1,4; 2,8$ mm)                                                                                                                                                                                                                    |
| Norme Belge NBN B 15-238                  | <input type="checkbox"/> Beam<br><input type="checkbox"/> Third-point loading | $b = d = 150$ mm<br>$l = 3d$<br>$4d \leq s \leq 5d$                                      | <input type="checkbox"/> Load<br><input type="checkbox"/> Net deflection at midspan                                   | <input type="checkbox"/> First crack strength<br><input type="checkbox"/> Flexural strength<br><input type="checkbox"/> Energy absorbed up to deflection $l/n$ (n=300, 150)<br><input type="checkbox"/> Equivalent flexural strength up to deflection $l/n$ (n=300, 150)<br><input type="checkbox"/> Ratio of load at a deflection of $l/n$ (n=300, 150) to the first crack load |
| Japan Concrete Institute Standard JCI-SF4 | <input type="checkbox"/> Beam<br><input type="checkbox"/> Third-point loading | $h = d = 100$ mm for $l < 40$ mm<br>$h = d = 140$ mm for $l > 40$ mm<br>$l = 3d + 80$ mm | <input type="checkbox"/> Load<br><input type="checkbox"/> Net deflection at midspan, or Net deflection at load points | <input type="checkbox"/> Flexural Strength<br><input type="checkbox"/> Load ratio $P^*_{max}/P_{max}$ ( $P^*_{max}$ = Maximum load on reloading after unloading at $0,9 P_{max}$ in the post -peak region; $P_{max}$ = Maximum load)                                                                                                                                             |
| DBV Recommendat. (Germany)                | <input type="checkbox"/> Beam<br><input type="checkbox"/> Third-point loading | $h = d = 150$ mm<br>$l = 600$ mm<br>$s = 700$ mm                                         | <input type="checkbox"/> Total load<br><input type="checkbox"/> Net deflection at midspan (avg)                       | <input type="checkbox"/> First crack strength<br><input type="checkbox"/> First crack load<br><input type="checkbox"/> Equivalent flexural load carrying capacity until deflection $\delta_{limit} = (G_{fibers}/\delta)$<br><input type="checkbox"/> Equivalent flexural strength until deflection $\delta_{limit}$                                                             |
| CUR Recommend. (The Netherlands)          | <input type="checkbox"/> Beam<br><input type="checkbox"/> Third-point loading | $h = d = 150$ mm<br>$l = 450$ mm<br>$s = 600$ mm                                         | <input type="checkbox"/> Total load<br><input type="checkbox"/> Net deflection at midspan                             | <input type="checkbox"/> First crack strength and load<br><input type="checkbox"/> Energy absorbed up to deflection $\delta$ ( $\delta = 1,5, 3$ mm)<br><input type="checkbox"/> Equivalent flexural strength up to deflection $d$ to the first crack strength.                                                                                                                  |
| Norwegian Concrete Association Recommend. | <input type="checkbox"/> Beam<br><input type="checkbox"/> Third-point loading | $h = 125$ mm<br>$d = 75$ mm<br>$l = 450$ mm<br>$s = 550$ mm                              | <input type="checkbox"/> Total load<br><input type="checkbox"/> Load point deflection                                 | <input type="checkbox"/> Flexural strength<br><input type="checkbox"/> Residual flexural strength at deflections of 1 mm and 3 mm<br><input type="checkbox"/> Toughness classification based on residual flexural strength                                                                                                                                                       |

$d$  = Depth,  $b$  = Thickness,  $l$  = Span,  $s$  = Overall length.

$\delta_r$  = Deflection limits for the test,  $P_f$  = Load limits for the test

## Punto di prima fessurazione

Un parametro di particolare interesse nel calcestruzzo fibrorinforzato è il “punto di prima fessurazione”, raggiunto il quale le fibre iniziano a manifestare il proprio contributo. Da un punto di vista meccanico tale punto potrebbe essere semplicemente associato al raggiungimento della deformazione ultima per trazione nel punto più sollecitato del provino. Considerando però l'eterogeneità del calcestruzzo, la determinazione di tale punto non può che essere di tipo convenzionale. Anzitutto si dovrebbe definire la scala di osservazione del materiale. Da un punto di vista microscopico il punto di prima fessurazione potrebbe corrispondere alla rottura dei legami intermolecolari; da un punto di vista macroscopico esso potrebbe corrispondere alla formazione di una macrofessura nella matrice cementizia che, nei calcestruzzi di normale resistenza, ha di solito origine all'interfaccia pasta di cemento-aggregato, caratterizzata da una maggior porosità locale. È ben noto che la macrofessura si forma però con la coalescenza di diverse microfessure presenti nell'intorno della zona più sollecitata del provino. A causa della complessità del meccanismo di formazione della fessura, in entrambi i casi il punto di prima fessurazione è di difficile determinazione.

Le normative attualmente in vigore si differenziano, tra l'altro, anche per il metodo adottato per la determinazione del punto di prima fessurazione. La formazione della prima fessura viene associata da alcune normative alla perdita di linearità della curva carico-spostamento [6]; tale scelta non è però particolarmente felice per una normativa in quanto

lascia una certa arbitrarietà nella determinazione del distacco della curva dal tratto lineare che, peraltro, non sempre è ben visibile (Fig. 4).

La normativa francese [8], belga [9] e le recenti linee guida del TC 162-TDF della RILEM [15], prescrivono di tracciare una parallela al tratto lineare della curva carico spostamento, a partire da un valore costante di 0.05 mm intercettato sull'asse delle ascisse (spostamento verticale). Tale metodo, oltre che soffrire della non sempre facile identificazione del tratto lineare, è influenzato dal valore empirico dell'intercetta (0.05 mm); ciò spesso comporta che la retta intersechi la curva sperimentale nel ramo discendente della curva carico-spostamento; in questo caso le normative citate richiedono di assumere come carico di prima fessurazione il carico di picco.

Tenendo conto di quanto prescritto dalla ISO 17025 [18] sulla assicurazione di qualità dei laboratori di prova, il metodo per la individuazione del punto di prima fessurazione dovrebbe essere il più possibile oggettivo lasciando il minimo spazio ad interpretazioni personali che potrebbero rendere impossibile il calcolo di un valore dell'incertezza di prova costante per tutti i laboratori. Inoltre, il metodo dovrebbe essere agevole e poco costoso, e quindi non dovrebbe richiedere l'utilizzo di strumentazione troppo sofisticata che potrebbe non essere disponibile in un normale laboratorio prove.

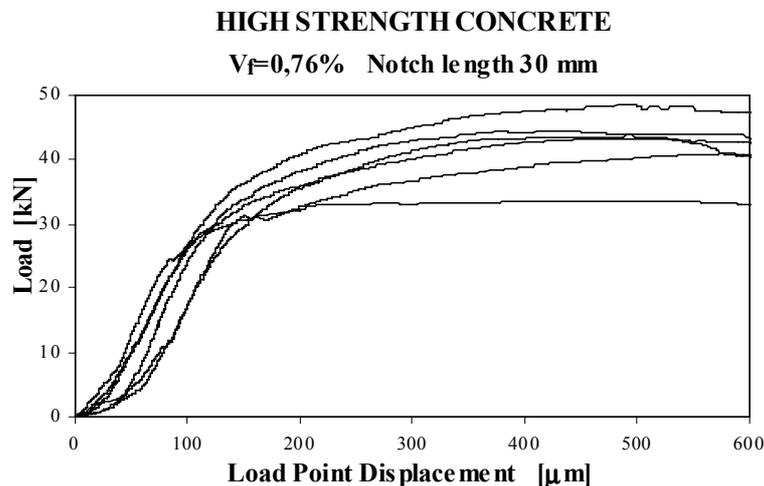


Figura 4

Curve carico-spostamento verticale ottenute da prove di flessione su travi di SFRC [19].

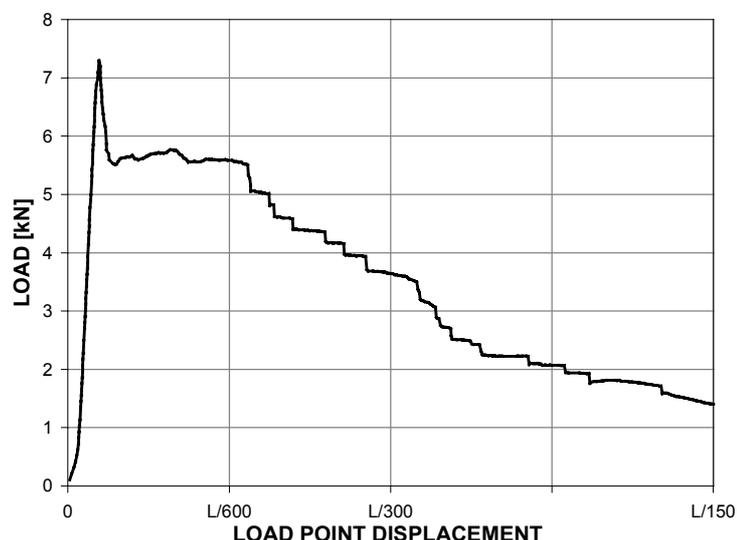
### Significato delle grandezze rilevate sperimentalmente

Le fibre sono utili nella misura in cui conferiscono al materiale duttilità e resistenza in fase post-fessurativa. Le normative esistenti si basano sulla definizione di indici adimensionali basati sull'energia dissipata nel processo di frattura e/o sulla resistenza che il materiale offre in fase post-picco.

Si deve innanzitutto sottolineare l'importanza dei valori di spostamento in corrispondenza dei quali effettuare le misure. Per esempio, l'ASTM C1018-92 [6] richiede di determinare il rapporto tra le aree sottese dalla curva carico spostamento fino a valori multipli dello spostamento di prima fessurazione e l'area sottesa dalla curva fino al punto di prima fessurazione. Tale metodo comporta che l'errore commesso nella individuazione del punto di prima fessurazione si ripercuota anche sulle soglie di determinazione delle aree. In aggiunta, l'area a denominatore dell'indice (area sottesa dalla curva fino al punto di prima fessurazione) è un'area molto piccola la cui (probabile) errata valutazione comporta dei grossi errori sul valore dell'indice stesso. Altre normative impongono invece dei limiti di misura sullo

spostamento verticale espresso come percentuale della luce della trave. Su questo principio si basa per esempio la normativa belga [9] che prevede di determinare la resistenza residua in corrispondenza di uno spostamento verticale del provino pari a 1/300 ed 1/150 della luce della trave (pari a 1.5 e 3.0 mm). La scelta di tali valori non tiene conto delle normali esigenze del progettista che deve assicurare il buon comportamento della struttura nelle condizioni di esercizio e limitare la probabilità di collasso nelle condizioni ultime. Per consentire la misura della sicurezza strutturale, al progettista dovrebbero essere forniti dei valori tensionali di riferimento significativi per le due condizioni tipiche per la struttura. Lo spostamento verticale del provino non è certamente una grandezza significativa per la progettazione, essendo questo troppo legato alle dimensioni del provino. Sicuramente più significativo potrebbe essere lo sforzo post-picco valutato in corrispondenza di un'apertura di fessura tipica per le condizioni di esercizio o per le condizioni ultime. Poiché l'apertura di fessura è di facile determinazione, questa grandezza potrebbe essere utilizzata come grandezza di riferimento per le soglie di misura della resistenza post-picco. La relazione tra l'apertura di fessura e lo spostamento verticale del provino dovrebbe necessariamente considerare anche il modulo elastico del calcestruzzo che governa lo spostamento verticale del provino, e quindi richiederebbe la determinazione di un ulteriore parametro. Inoltre, la curva dello spostamento verticale è spesso influenzata da un tratto iniziale con concavità verso l'alto dovuto all'assestamento iniziale del provino sul banco di prova (Figg. 4 e 5); tale tratto deve quindi essere escluso dalla curva per il calcolo dei parametri a frattura.

Un altro aspetto interessante della prova riguarda la scelta della tensione post-fessurazione che potrebbe essere effettuata localmente (in corrispondenza di un determinato valore dello spostamento), o in un certo intervallo di spostamento. Con la seconda scelta si determina una tensione media (equivalente) che è meno influenzata dalle discontinuità locali frequentemente presenti nel caso di un calcestruzzo rinforzato con un limitato dosaggio di fibre (Fig. 5).



*Figura 5*

*Tipica curva carico-spostamento verticale di un calcestruzzo fibrorinforzato con un evidente assestamento iniziale e notevoli discontinuità nel ramo post-picco.*

Un ultimo aspetto riguarda il numero di parametri da utilizzare per la classificazione del materiale. È sicuramente forte la tentazione di utilizzare un unico parametro, come l'indice di tenacità (rapporto tra aree sottese dalla curva carico-spostamento o tra tensioni post-

fessurazione) o una tensione equivalente. Purtroppo, una sola grandezza non è in generale sufficiente; per esempio, un elevato valore dell'indice di tenacità potrebbe classificare favorevolmente un calcestruzzo con una modestissima resistenza a trazione, così come un elevato valore della tensione post-fessurazione potrebbe nascondere un comportamento fragile (post-picco) del materiale. Per meglio comprendere lo spirito di questa scelta si potrebbe paragonare l'SFRC ad una macchina che genera potenza; in tal caso i parametri adimensionali utilizzabili per valutare l'SFRC (indice di tenacità) sono paragonabili al rendimento della macchina, mentre i parametri dimensionali (tensioni medie equivalenti) sono paragonabili alla potenza generata dalla medesima macchina. È chiaro che in molte applicazioni può essere sufficiente conoscere solo il rendimento o solo la potenza generata, ma è altrettanto evidente che solo la conoscenza di entrambi i parametri consente una chiara valutazione delle caratteristiche della macchina.

### **Necessità di un nuovo documento normativo**

Sulla base delle considerazioni fatte nei paragrafi precedenti, è emersa la necessità di redigere un documento normativo sul calcestruzzo fibrorinforzato in grado di fornire parametri utili sia per la classificazione che per la valutazione delle prestazioni del materiale ai fini del calcolo strutturale.

Il rilievo sperimentale delle grandezze necessarie per la definizione dei parametri deve rispondere ai seguenti requisiti di base:

- ◆ essere il più possibile oggettivo e non soggetto a interpretazioni personali;
- ◆ non deve richiedere strumentazioni particolarmente sofisticate e dunque deve essere agevole e poco costoso.

Il primo dei due requisiti sopra esposti diventa particolarmente stringente nell'ottica dell'assicurazione di qualità.

Contrariamente a quanto previsto dalla normativa attualmente in vigore, la bozza di norma UNI si basa sul rilievo di spostamenti locali (Crack Tip Opening Displacement e Crack Mouth Opening Displacement) i quali sono influenzati da deformazioni spurie in misura irrilevante e soddisfano i requisiti sopraelencati.

La bozza di norma UNI fornisce tre parametri, fra loro indipendenti, volti a caratterizzare univocamente il materiale. La caratterizzazione avviene attraverso la valutazione della resistenza di prima fessurazione e di indici che evidenziano la fragilità del materiale in intervalli di apertura di fessura significativi per le condizioni di esercizio e ultime.

Il punto di prima fessurazione deve essere individuato sul cosiddetto calcestruzzo di riferimento, il quale deve rappresentare la stessa matrice cementizia del SFRC. In alternativa la norma prevede comunque un metodo semplificato per la sua determinazione senza far ricorso al calcestruzzo di riferimento.

### **Ringraziamenti**

Questa ricerca è stata realizzata nell'ambito della collaborazione fra il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Brescia e il CTG - Italcementi Group di Bergamo; gli Autori ringraziano il Dr. Luigi Cassar, Responsabile della Direzione Centrale Ricerca e Sviluppo del CTG – Italcementi Group, per aver favorito la presente ricerca.

## Bibliografia

- [1] Walraven J. “*The evolution of Concrete*”, *Structural concrete*, **1**, 3-11, **1999**
- [2] ACI 544.4R “*Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete (Reported by ACI Committee 544)*”, *ACI Structural Journal*, **85 (5)**, 563-580, **1988**
- [3] Falkner H., Henke V., Hinke U. “*Stahlfaserbeton für tiefe Baugruben im Grundwasser*”, *Bauingenieur*, **72**, 47-52, **1997**
- [4] Plizzari G. A., Cangiano S., Cere N. “*Postpeak behaviour of Fiber-Reinforced Concrete under Cyclic Tensile loads*”, *ACI Materials Journal*, **97 (2)**, 182-192, **2000**
- [5] Di Prisco M., Felicetti R., Toniolo G., Failla C. “*Criteri progettuali d’impiego strutturale del calcestruzzo fibrorinforzato in elementi precompressi prefabbricati per coperture*”, *Giornate AICAP 99*, **1**, 137-146, Torino, 4-6 Novembre, **1999**
- [6] ASTM, “*Standard test method for Flexural Toughness and First-Crack strength of Fiber-Reinforced Concrete (using beam with third-point loading)*”, *ASTM C 1018-92*, *ASTM Annual book of standards*, **04.02**, 510-516, **1992**
- [7] AENOR “*Determinación del Índice de Tenacidad y Resistencia a Primera Fisura*”, *Norma Española, UNE 83-510-89*, Asociación Española de Normalización y Certificación, 4 pp., **1989**
- [8] AFNOR “*Béton avec Fibres Métalliques – Essai de Flexion*”, *Normalisation Française P18-409*, L’association Française de Normalisation (AFNOR), 8 pp., **1993**
- [9] IBN “*Essais des Bétons Renforcés de Fibres – Essai de Flexion sur éprouvettes prismatiques*”, *Norme Belge NBN B 15-238*, Institute Belge de Normalisation (IBN), 9 pp., **1992**
- [10] JCI “*Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete*”, *JCI Standard SF4*, Japan Concrete Institute Standards for test methods of fiber reinforced concrete, pp.45-51, **1984**
- [11] DBV “*Grundlagen zur Bemessung von Industriefußböden aus Stahlfaserbeton*”, *Deutschen Beton-Vereins*, 258-272, **1991**
- [12] CUR “*Bepaling van de Buigtrekkerk de Buigtaaiheid en de Equivalente Buigtreksterkte van Staalvezelbeton*”, *Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, The Netherlands*, 12 pp., **1994**
- [13] NB “*Sprayed Concrete for Rock Support – Technical Specifications and Guidelines*”, *Norwegian Concrete Association*, **7**, 74 pp., **1993**
- [14] Gopalaratnam V.S., Gettu R. “*On the Characterization of Flexural Toughness in Fiber Reinforced Concretes*”, *Cement and concrete composites*, **17**, 239-254, **1995**
- [15] RILEM TC 162 TDF “*Bending Test - Recommendations*”, *Materials and Structures*, **33**, 3-5, **2000**
- [16] Bentur A., Mindess S. “*Fibre Reinforced Cementitious Composites*”, Elsevier Science Publishers, **1990**
- [17] Cangiano S., Cucitore R., Plizzari G.A. “*Indagine sperimentale e numerica per la messa a punto di metodi di prova per la valutazione delle prestazioni di calcestruzzi rinforzati con fibre di acciaio*”, *Technical report*, **2000**, in print
- [18] ISO 17025 “*General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratory*”, **1999**
- [19] Rambaldini C. “*Valutazione della duttilità di calcestruzzi fibrorinforzati*”, *Graduate Thesis, Università degli Studi di Brescia*, **1999**