

LE FIBRE NEL CALCESTRUZZO: EFFETTI SULLA RESISTENZA A FATICA

Stefano Cangiano⁽¹⁾, Giovanni A. Plizzari⁽²⁾ e Paolo Colosio⁽²⁾

⁽¹⁾ CTG-Italcementi Group, via G. Camozzi 124, 24121 Bergamo

⁽²⁾ Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Brescia, via Branze 38, 25123 Brescia

Sommario

Il presente lavoro riguarda lo studio del comportamento a fatica del calcestruzzo fessurato con prove di trazione diretta su provini cilindrici. In particolare vengono considerati calcestruzzi di ordinaria resistenza e ad alta resistenza con diversi dosaggi di fibre di acciaio e di carbonio, sottoposti a carichi ciclici di diversa ampiezza. I risultati sperimentali sono confrontati con alcuni modelli teorici disponibili in letteratura.

Abstract

In the present work fatigue behaviour of cracked concrete is studied by means of direct tension tests on cylindrical specimens. Normal strength concrete as well as high strength concrete with different volume fractions of steel and carbon fibres are subjected to cyclical loads with different amplitudes. The experimental results are compared with some theoretical models available into the literature.

1. Introduzione

Lo studio sulla fatica nel calcestruzzo ha ricevuto un ulteriore impulso in seguito al forte sviluppo della ricerca sui nuovi materiali e sulle tecniche di progettazione. In particolare, l'utilizzo del calcestruzzo ad alta resistenza ha comportato una riduzione del peso proprio delle strutture ed ha accentuato gli effetti della variabilità dei carichi accidentali. Considerando che nelle strutture sono normalmente presenti delle fessure dovute ai gradienti igro-termici oltre che alle azioni esterne, diventa importante studiare il comportamento a fatica del calcestruzzo. Alcuni ricercatori hanno recentemente osservato che il danneggiamento nelle strutture in calcestruzzo sottoposte a carichi ciclici si verifica principalmente nella zona microfessurata presente all'apice della fessura (*Fracture Process Zone, FPZ*) [1]. Ciò giustificerebbe la dipendenza della resistenza a fatica dalla storia di carico, il cosiddetto "effetto sequenza", che alcuni ricercatori hanno riscontrato realizzando prove sperimentali su provini strutturali [2], nei quali la dimensione della zona di processo è fortemente influenzata dalle dimensioni del provino [3]. Il comportamento a fatica di strutture in calcestruzzo può quindi essere studiato solo conoscendo il comportamento del materiale nella zona di processo; tale studio può essere effettuato per mezzo di prove cicliche di trazione diretta su provini già fessurati [4] (Fig. 1).

Le prove di trazione diretta sul calcestruzzo fessurato hanno principalmente riguardato cicli sulla curva inviluppo (tratto BC di Fig. 1). Le prime prove con cicli interni alla curva inviluppo (tratto AB di Fig. 1) sono state realizzate da Reinhardt e Cornelissen [5] ma il comportamento del materiale in tale fase è stato mostrato recentemente in [4,6]. Questi risultati hanno mostrato il progressivo danneggiamento provocato dai cicli interni e che lo spostamento δ continua ad aumentare fino al raggiungimento della curva inviluppo (punto B di Fig. 1); inoltre, la curva inviluppo P- δ delle prove cicliche è molto simile alla curva ottenuta dalle prove statiche, come già osservato da Hordijk [7].

La sostanziale coincidenza della curva inviluppo delle prove cicliche con la curva statica assume particolare importanza per i calcestruzzi fibrinforzati, caratterizzati da resistenze residue post-picco molto superiori a quelle dei corrispondenti calcestruzzi senza fibre. Dopo i pionieristici lavori di Romualdi e Batson [8], le numerose ricerche rivolte allo studio delle proprietà meccaniche dei calcestruzzi fibrinforzati hanno evidenziato i notevoli benefici delle fibre sulla matrice cementizia, che si manifestano soprattutto in termini di resistenza residua post-picco e di capacità di limitare lo stato fessurativo del materiale.

Lo scopo del presente lavoro è lo studio sull'effetto delle fibre sul comportamento a fatica del calcestruzzo fessurato. In particolare vengono considerati calcestruzzi ordinari e ad alta resistenza, senza fibre, con fibre di carbonio e con fibre di acciaio a diversi dosaggi. La sperimentazione ha riguardato prove di trazione diretta su provini cilindrici sottoposti sia a cicli interni alla curva inviluppo, con diversi livelli di carico, che a cicli sulla curva inviluppo, in modo da offrire informazioni su tutte le fasi caratterizzanti il materiale nella zona di processo [4]. Sugli stessi materiali sono state effettuate anche prove di trazione diretta statiche per determinare le loro proprietà a frattura. Allo scopo di studiare il comportamento del materiale nella zona di processo, l'applicazione dei carichi ciclici è iniziata dopo aver precaricato il provino in modo quasi statico fino al raggiungimento del carico di picco, cioè dopo aver provocato la formazione di una zona microfessurata nel provino (Fig. 1). I risultati sperimentali ottenuti sono confrontati con alcuni modelli teorici disponibili in letteratura.

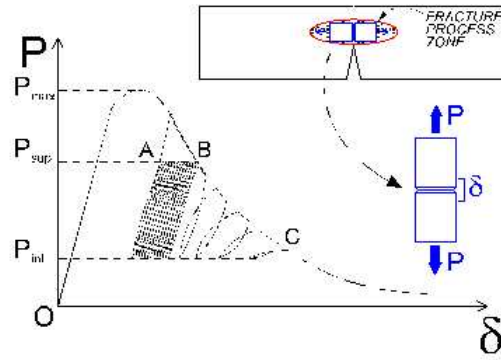


Figura 1: Schema di carico della prova ciclica.

1. Parte sperimentale

La Tabella 1 mostra la composizione e le resistenze caratteristiche dei calcestruzzi utilizzati nel presente lavoro.

Tabella 1: Caratteristiche dei calcestruzzi impiegati nelle prove sperimentali.

Materiale	Tipo	Cemento	Acqua	a/c	Fibre	Aggregati	Slump	f_{ct}	G_F
	Cemento	[Kg/mc]	[l/mc]		[Kg/mc]	[Kg/mc]	[cm]	[MPa]	[J/mq]
NSC	32.5	370	207	0.56	-	1794	13	3.87	138
NSC-SFR	32.5	370	219	0.59	30	1748	13	4.09	2288
HSC	52.5	550	160	0.29	-	1711	20	4.96	133
HSC-CFR	52.5	550	160	0.29	6.7	1698	10	5.31	135
HSC-SFR	52.5	550	160	0.29	30	1701	17	5.45	898
HSC-SFR2	52.5	550	160	0.29	60	1687	17	4.76	1519
HSC-SFR3	52.5	550	160	0.29	90	1670	17	5.14	2110

Il cemento utilizzato per il calcestruzzo di normale resistenza (NSC) è di Tipo II/A-L 32.5R mentre quello utilizzato per i calcestruzzi ad alta resistenza è di Tipo I 52.5R. Tutti i calcestruzzi ad alta resistenza (HSC) sono stati confezionati impiegando anche fumo di silice con un dosaggio di 55 Kg/mc. Sono state utilizzate fibre di acciaio ad omega Dramix ZP 30/.50 e fibre di carbonio RK10 ($l=20\text{mm}$, $\phi=0.008\text{mm}$).

Nel calcestruzzo ordinario sono state utilizzate solo fibre metalliche con dosaggio di 30 kg/mc (NSC-SFR), corrispondenti ad una percentuale volumetrica $V_f=0.38\%$, mentre nel calcestruzzo ad alta resistenza sono state impiegate fibre metalliche con dosaggi di 30 (HSC-SFR, $V_f=0.38\%$), 60 (HSC-SFR2, $V_f=0.76\%$) e 90 kg/mc (HSC-SFR3; $V_f=1.15\%$), e fibre di carbonio con dosaggio di 6.7 kg/mc (HSC-CFR; $V_f=0.38\%$).

I provini, di forma cilindrica con un diametro di 80 mm ed un'altezza di 210 mm, sono stati intagliati, mediante una tornitura meccanica, lungo la circonferenza nella sezione di mezzera, allo scopo di ridurre la sezione resistente e forzare così l'innesco della fessura [4]. L'intaglio ha forma triangolare con un angolo di 90° per una profondità di 4 mm (Fig. 2).

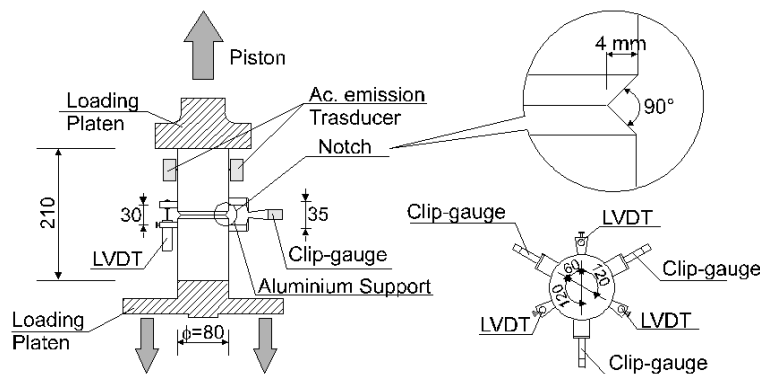


Figura 2: Provino cilindrico e strumentazione.

La strumentazione impiegata ha consentito di rilevare l'apertura di fessura, l'emissione acustica, in termini di conteggio cumulativo di eventi acustici, ed il carico applicato al provino. La prova è condotta in controllo di spostamento usando come controllo il segnale proveniente da tre trasduttori di spostamento resistivi (*clip-gauges*), disposti a 120° sul provino (Fig. 2). L'apertura della fessura è misurata mediante tre trasduttori di spostamento induttivi (LVDT) applicati tra i *clip gauges*. L'emissione acustica (A.E.) è stata rilevata da due sensori messi a contatto col provino in posizioni diametralmente opposte ed impiegando grasso siliconico come mezzo di accoppiamento (Fig. 2).

Dopo aver raggiunto il carico di picco con spostamento monotonamente crescente, e quindi dopo aver provocato la formazione di una zona di processo in corrispondenza dell'intaglio, il provino è stato sottoposto a cicli interni alla curva involuppo (zona AB di Fig. 1). Questa fase della prova è stata condotta sempre in controllo di spostamento verificando (via *software*) che il carico variasse entro i limiti, stabiliti all'inizio della prova, espressi come percentuale del carico massimo raggiunto nella fase statica iniziale. Una volta raggiunta la curva involuppo (punto B di Fig. 1), la prova è proseguita con cicli che raggiungevano la curva involuppo (zona BC di Fig. 1). Ciò è stato possibile sia per aver condotto la prova in controllo di spostamento, ma soprattutto grazie alla notevole rigidità della macchina di prova disponibile presso il CTG Italcementi Group di Bergamo.

La prova è completamente gestita da un apposito *software* [4,6] che consente di eseguire la prova sia nella fase statica pre-picco che nella fase ciclica post-picco (Fig. 1). I materiali, la strumentazione, la macchina e le modalità di prova sono dettagliatamente descritti in [9].

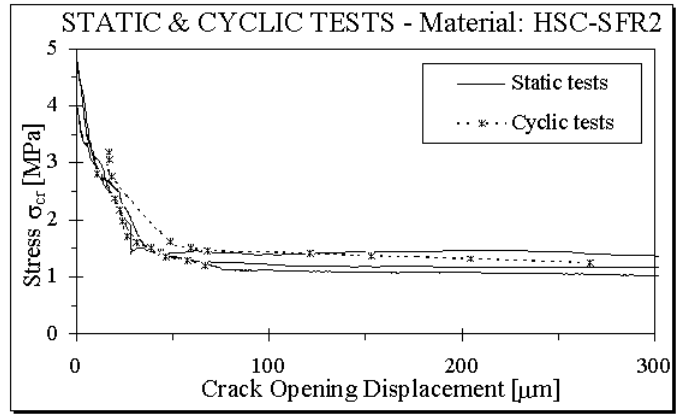
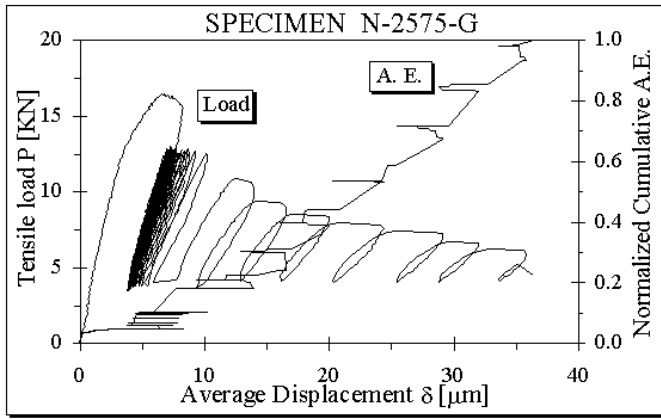
3. Risultati e discussione

La fase sperimentale è iniziata con l'esecuzione di prove statiche per determinare i principali parametri di frattura dei diversi calcestruzzi. Successivamente sono state effettuate le prove cicliche con due diverse soglie di carico: la prima con carico variabile tra il 25% ed il 75% del carico di picco misurato nella fase iniziale della prova, la seconda con soglie del 15% e del 65% di P_{max} .

Le prove statiche hanno evidenziato la notevole resistenza residua post-picco dei calcestruzzi con fibre di acciaio rispetto agli stessi calcestruzzi senza fibre, che aumenta all'aumentare del dosaggio di fibre.

Una tipica curva carico-spostamento registrata durante una prova ciclica è mostrata in Fig. 3a; si può notare che l'emissione acustica cumulativa incrementa soprattutto durante l'applicazione dei cicli sulla curva involuppo, a dimostrazione del fatto che il danneggiamento del materiale (per il quale la A.E. rappresenta un utile strumento di valutazione [10]) si verifica prevalentemente (anche se non completamente) in quest'ultima fase. I risultati sperimentali hanno confermato che la curva involuppo delle prove cicliche è quasi coincidente con la curva ottenuta dalle prove statiche [4,6,7], come evidenziato nella Fig. 3b, ove è mostrato la relazione tra la tensione residua post-picco σ_{cr} (=carico/area) e l'apertura di fessura. Quest'ultima è stata calcolata sottraendo allo spostamento misurato (δ) il contributo elastico e lo spostamento irreversibile dovuto alla microfessurazione che si verifica prima del raggiungimento del picco di carico [7].

Sulla base delle precedenti considerazioni, è lecito attendersi un aumento della vita a fatica dei calcestruzzi con fibre rispetto ai calcestruzzi senza fibre. Infatti, le fibre, allungando il percorso necessario per raggiungere la curva involuppo, dovrebbero fornire una maggiore resistenza a fatica del calcestruzzo per effetto del maggior numero di cicli interni (che costituiscono la quasi totalità dei cicli applicabili al provino) necessari per raggiungere la curva involuppo.

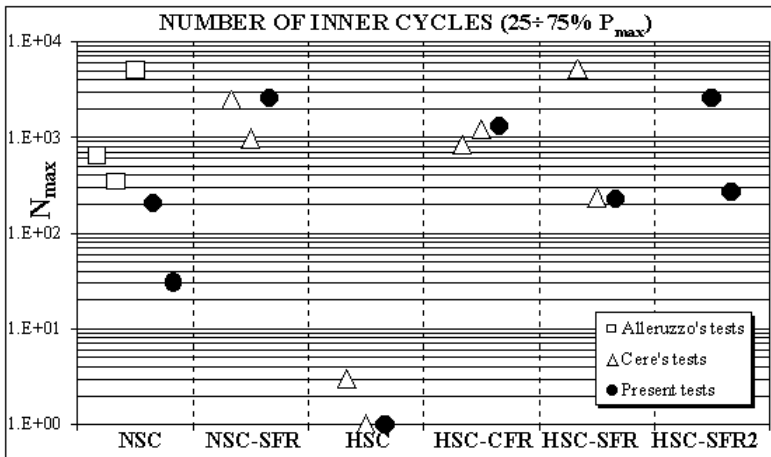


(a)

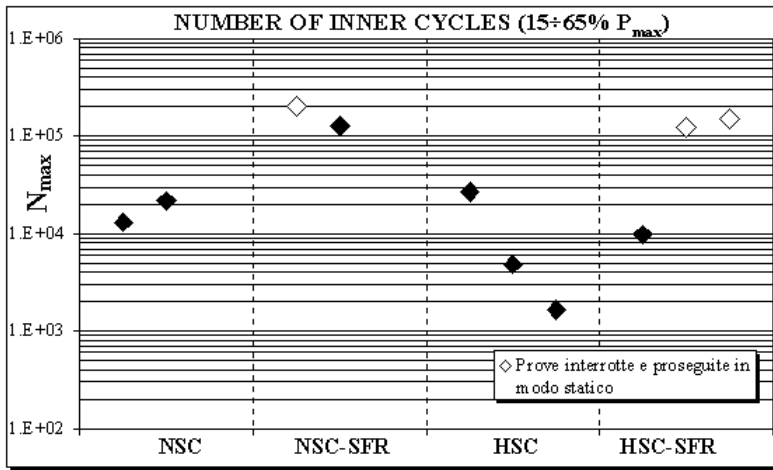
(b)

Figura 3: Diagramma carico-spostamento ottenuto da una generica prova ciclica (a); confronto fra le curve σ_{cr-w} ottenute dalle prove statiche e dalle prove cicliche (limitatamente ai punti sulla curva involuppo) per il calcestruzzo HSC-SFR2.

In realtà, le prove cicliche condotte con soglie di carico pari al 25% e 75% di P_{max} non hanno evidenziato significativi miglioramenti della resistenza a fatica del calcestruzzo in seguito all'aggiunta di fibre con i diversi dosaggi impiegati (Fig. 4a). Questo comportamento è quasi certamente dovuto al fatto che, per soglie di carico elevate e quindi con piccoli valori di apertura di fessura, le curve involuppo del calcestruzzo con e senza fibre coincidono in quanto l'effetto delle fibre è trascurabile [6]. Viceversa, le prove con soglie di carico pari al 15% e 65% di P_{max} , nonostante la attesa maggiore dispersione dei risultati, hanno messo bene in evidenza i benefici effetti delle fibre sul comportamento a fatica.



(a)



(b)

Figura 4: Numero di cicli interni (N_{max}) ottenuti da tutti i materiali studiati con soglie di carico del 25 e 75% (a) e del 15 e 65% (b) di P_{max} .

Infatti, nella maggior parte dei casi, sui provini con fibre di acciaio sono stati applicati circa $1.5 \div 2 \cdot 10^5$ cicli senza che si verificasse il collasso per fatica del provino (le prove sono successivamente proseguite caricando monotonamente il provino come nelle prove statiche). Nei calcestruzzi senza fibre il collasso per fatica si è verificato dopo aver applicato ai provini $10^3 - 10^4$ cicli (almeno un ordine di grandezza inferiore ai provini con fibre; Fig. 4b). Nonostante l'incertezza legata al numero di cicli che le prove interrotte avrebbero effettivamente potuto raggiungere, si può comunque concludere che, per queste soglie di carico, la presenza delle fibre di acciaio ha incrementato la resistenza a fatica sia del calcestruzzo ordinario che del calcestruzzo ad alta resistenza.

I risultati sperimentali sono poi stati confrontati con i modelli disponibili in letteratura. Per quanto riguarda i cicli che percorrono la curva involuppo, si è fatto riferimento al modello di Hordijk (*Continuous Function Model*) [7]. Tale modello è caratterizzato da tre espressioni, relative alla curva di scarico (I), all'incremento di apertura di fessura che si verifica tra il punto in cui il ciclo lascia ed il punto in cui il ciclo ritorna sulla curva involuppo (II), ed alla curva di ricarico (III, Fig. 5):

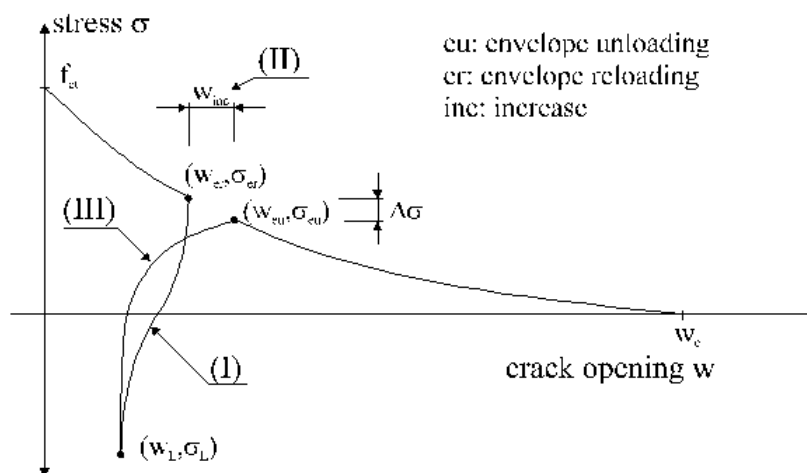


Figura 5: Modello di Hordijk per un ciclo di scarico-ricarico sulla curva involuppo [7].

$$\sigma = \sigma_{eu} + f_{\alpha} \cdot \left(\frac{1}{3 \cdot w_{eu} / w_c + 0.4} \right) \cdot \left\{ 0.014 \cdot \left[\ln \left(\frac{w}{w_{eu}} \right) \right]^5 - 0.57 \cdot \left(1 - \frac{w}{w_{eu}} \right)^{0.5} \right\} \quad (I)$$

$$w_{inc} = 0.1 \cdot w_{eu} \cdot \left[\ln \left(1 + 3 \cdot \frac{\sigma_{eu} - \sigma_L}{f_{ct}} \right) \right] \quad (II)$$

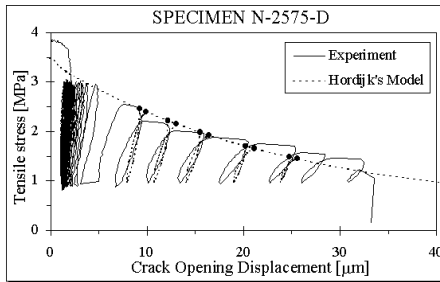
$$\sigma = \sigma_L + \sigma_L \cdot \left\{ \frac{1}{c_3} \cdot \left(\frac{w - w_L}{w_{er} - w_L} \right)^{0.2c_3} + \left[1 - \left(1 - \frac{w - w_L}{w_{er} - w_L} \right)^2 \right]^{c_4} \right\} \cdot \left(\frac{c_3}{c_3 + 1} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{er} - 1}{\sigma_L - 1} \right) \quad (III)$$

dove c_3 e c_4 assumono le seguenti espressioni:

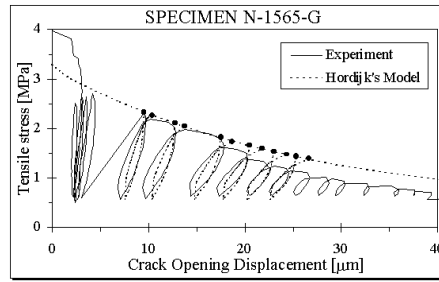
$$c_3 = 3 \cdot \left(3 \cdot \frac{f_{ct} - \sigma_L}{f_{ct}} \right)^{\left(-1 - 0.5 \frac{w_{eu}}{w_e} \right)} \cdot \left[1 - \left(\frac{w_{eu}}{w_e} \right)^{\left(\frac{0.7 \cdot f_{ct}}{f_{ct} - \sigma_L} \right)} \right] \quad c_4 = \left[2 \cdot \left(3 \cdot \frac{f_{ct} - \sigma_L}{f_{ct}} \right)^{-3} + 0.5 \right]^{-1}$$

L'espressione della curva involucro utilizzata dal modello di Hordijk è quella che lo stesso Autore ha proposto per le prove statiche sul calcestruzzo di normale resistenza [7]. Tale curva ha consentito di approssimare molto bene i risultati ottenuti dai provini di calcestruzzo sia di normale che ad alta resistenza ma non quelli ottenuti dai provini di calcestruzzo fibrorinforzato caratterizzati da un ramo post-picco molto diverso da quello dei calcestruzzi senza fibre [9]. Per tali calcestruzzi è stato utilizzata la curva σ_{cr} -w iperbolica a due parametri proposta da Stang [11]. Ulteriori dettagli sull'applicazione del *Continuous Function Model* ai calcestruzzi ad alta resistenza e fibrorinforzati sono descritti in [9].

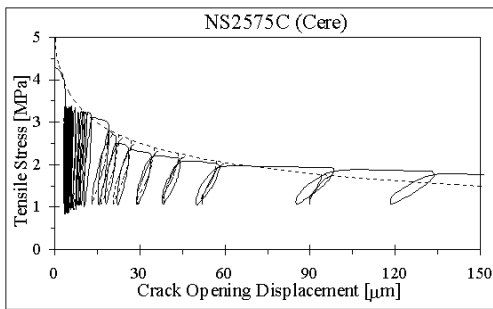
Oltre che con i risultati delle prove effettuate nel presente lavoro, il modello di Hordijk è stato confrontato con i risultati di prove analoghe presentati in [4,6]. La Figura 6 mostra il confronto tra la curva teorica sforzo-apertura di fessura ed i risultati sperimentali ottenuta da provini dei diversi materiali durante la fase dei cicli sulla curva involucro. In particolare, nelle Figg. 6a e 6b sono riportati i risultati ottenuti dai provini di calcestruzzo di normale resistenza senza fibre sottoposti a due diversi livelli di carico (25-75% e 15-65%) durante la fase di applicazione dei cicli interni [4], mentre nelle Figg. 6c e 6d sono riportate le curve relative ai provini con fibre di acciaio ($V_f=0.38\%$) in calcestruzzo di normale resistenza (Fig. 6c) e ad alta resistenza (Fig. 6d), entrambi sottoposti ad un carico variabile tra il 25% ed il 75% di P_{max} [6]. Appare evidente come il modello riesca a descrivere con buona precisione i cicli ottenuti sperimentalmente per le diverse soglie di carico e per i diversi materiali impiegati.



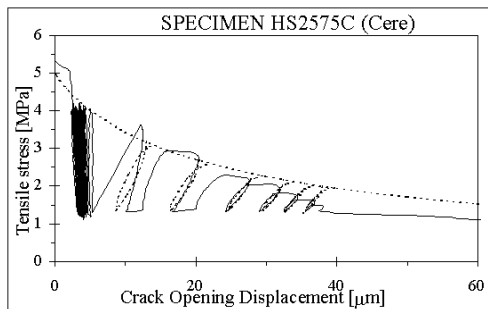
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6: Confronto fra le curve sperimentali ed il modello di Hordijk [7], relative ai provini N-2575-D (a) e N-1565-G (b) in calcestruzzo ordinario senza fibre, NS2575C in calcestruzzo ordinario con fibre di acciaio ($V_f=0.38\%$) (c) e HS-2575-C in calcestruzzo ad alta resistenza con fibre di acciaio ($V_f=0.38\%$).

Il confronto teorico-sperimentale ha riguardato anche i cicli interni alla curva involucro; in questo caso il danneggiamento che si è verificato durante

l'applicazione dei cicli interi è stato confrontato con il modello proposto in [4]; tutti i diagrammi sono riportati in [9].

4. Conclusioni

I principali risultati del presente studio sperimentale su provini sottoposti a carichi ciclici in fase fessurata sono riassunti nel seguito.

La curva involucro σ_{cr-w} delle prove cicliche è molto vicina alla analoga curva ottenuta dalle prove statiche con spostamento monotonamente crescente.

Per soglie di carico superiore pari al 75% del carico massimo, la presenza di fibre di acciaio, pur dando luogo ad un incremento della vita a fatica rispetto al calcestruzzo senza fibre, non ha comunque permesso di raggiungere un numero di cicli interni molto elevato (Fig. 4a). Nei provini con carico variabile tra il 15% ed il 65% del carico massimo, in diversi provini di calcestruzzo con fibre non si è verificato il collasso per fatica anche dopo aver applicato agli stessi un numero di cicli di un ordine di grandezza superiore al numero di cicli che ha provocato il collasso dei provini senza fibre (Fig. 4b).

La modellazione dei cicli interni alla curva involucro per il calcestruzzo ordinario con il *Continuous Function Model* proposto da Hordijk ha permesso di ottenere un buon accordo con i risultati sperimentali per i calcestruzzi senza fibre, sia ordinari che ad alta resistenza. Adottando lo stesso modello ma una legame σ_{cr-w} più idoneo per i calcestruzzi fibrorinforzati, è stato possibile descrivere i cicli che percorrono la curva involucro per i calcestruzzi ordinari e ad alta resistenza fibrorinforzati (Fig. 6).

Bibliografia

1. V. Slowik, G.A. Plizzari e V.E. Saouma, Fracture of Concrete under Variable Amplitude Loading, *ACI Materials Journal*, 93(3), pp.272-283, 1996.
2. H.K. Hilsdorf e C.E. Kesler, Fatigue Strength of Concrete under Varying Flexural Stresses, *Journal of the American Concrete Institute*, 63, pp. 1059-1076, 1964.
3. E. Smith, The Elastically Equivalent Softening zone size for an Elastic-Softening material: I. Power law Softening behaviour, *Mech. of Materials*, 17, pp.363-368, 1994.
4. G.A. Plizzari, S. Cangiano e S. Alleruzzo, The Fatigue Behaviour of Cracked Concrete, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 20(8), pp.1195-1206, 1997.
5. H.W. Reinhardt e H.A.W. Cornelissen, Post-peak Cyclic behavior of Concrete in Uniaxial Tensile and Alternating Tensile and Compressive Loading, *Cement and Concrete Research*, 14(2), pp.263-270, 1984.
6. G.A. Plizzari, S. Cangiano e N. Cere, Sul comportamento a frattura di calcestruzzi ad alta resistenza e fibrorinforzati sottoposti a carichi ciclici, IGF13, pp.71-80, 1997.
7. D.A. Hordijk, Local approach to Fatigue of Concrete, *Doctoral Thesis*, Delft University of Technology, 1991.
8. J.P. Romualdi e G.B. Batson, Mechanics of Crack Arrest in Concrete, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 89(3), pp.147-168, 1963.
9. S Cangiano, G.A. Plizzari e P. Colosio, La fatica nei calcestruzzi ordinari, ad alta resistenza e fibrorinforzati , Università di Brescia, Dipartimento di Ing. Civile, *Technical Report*, 1998.
10. P. Rossi, J.L. Robert, J.P. Gervais e D. Bruhat, Acoustic emission applied to study crack propagation in concrete, *Materials and Structures*, 22, pp 574-584, 1989.
11. H. Stang, Evaluation of Properties of Cementitious Fiber Composite Materials. *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, ed. Reinhardt e Naaman, Vol. 1, Chapter 30, 1992.

Atti del convegno

[[Precedente](#)] [[Successiva](#)]

Versione HTML realizzata da

