

SUL COMPORTAMENTO A FRATTURA DI CALCESTRUZZI AD ALTA RESISTENZA E FIBRORINFORZATI SOTTOPOSTI A CARICHI CICLICI

Giovanni A. Plizzari¹, Stefano Cangiano² e Nicola Cere¹

¹*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Brescia,
Via Branze, 38, 25123 Brescia;*

²*CTG Italcementi Group, Via G. Camozzi, 124, 24121 Bergamo.*

SOMMARIO: La valutazione della resistenza ultima o del buon comportamento in esercizio delle strutture di calcestruzzo, a causa della modesta resistenza a trazione del materiale, non può in generale prescindere dallo studio del comportamento delle fessure. L'impiego recente di particolari strutture di calcestruzzo sottoposte a carichi dinamici e l'uso di calcestruzzi ad alta resistenza con la conseguente riduzione delle dimensioni degli elementi strutturali e quindi del peso proprio della struttura, ha riportato alla luce un certo interesse nello studio del comportamento a fatica del calcestruzzo. Scopo del presente lavoro è lo studio sperimentale del comportamento di calcestruzzi ad alta resistenza e fibrorinforzati in presenza di carichi ciclici. In particolare vengono considerati calcestruzzi di ordinaria resistenza con fibre di acciaio e calcestruzzi ad alta resistenza senza fibre e con fibre di acciaio e di carbonio. Al fine di poter meglio studiare il comportamento del materiale, sono state effettuate prove di trazione diretta su provini cilindrici

PAROLE CHIAVE: Fatica, Carichi Ciclici, Fessurazione, Prove di Trazione Diretta, Calcestruzzo ad Alta Resistenza, Fibre, Danneggiamento Strutturale

INTRODUZIONE

La valutazione della resistenza ultima o del buon comportamento in esercizio delle strutture di calcestruzzo, a causa della modesta resistenza a trazione del materiale, non può in generale prescindere dallo studio del comportamento delle fessure. Recentemente è nato un notevole interesse per lo studio del problema della fessurazione nelle strutture di calcestruzzo impiegando moderni metodi di analisi come la meccanica della frattura (Wittmann, 1995).

L'impiego recente di particolari strutture di calcestruzzo sottoposte a carichi dinamici e l'uso di calcestruzzi ad alta resistenza con la conseguente riduzione delle dimensioni degli elementi strutturali e quindi del peso proprio della struttura, ha riportato alla luce un certo interesse nello studio degli effetti dei carichi ciclici sul calcestruzzo.

Benché il problema della fatica nel calcestruzzo sottoposto a compressione sia stato oggetto di numerose ricerche (Cornelissen, 1986), il comportamento a frattura del calcestruzzo sottoposto a carichi ciclici è un problema ancora aperto. Il problema della propagazione delle fessure in presenza di carichi ciclici di ampiezza variabile è stato

affrontato da Slowik, Plizzari e Saouma (1996) che, analizzando i risultati di numerose prove sperimentali, hanno osservato che il danneggiamento per fatica nelle strutture di calcestruzzo si verifica prevalentemente nella zona microfessurata presente all'apice della fessura (*Fracture Process Zone*). Per poter applicare la teoria della Meccanica della Frattura al calcestruzzo fessurato sottoposto a carichi ciclici, è necessario quindi conoscere il comportamento non lineare del materiale nella zona di processo. Studi di questo problema sono stati intrapresi da Yankelevsky e Reinhardt (1989) e da Hordijk (1991), che hanno proposto modelli teorici di comportamento in termini di legame sforzo-apertura di fessura coesiva. Tali modelli riguardano esclusivamente i cicli che partono e arrivano sulla curva involuppo discendente (*Virgin Curve*), tipica del calcestruzzo fessurato (Fig. 1a). Plizzari, Cangiano e Alleruzzo (1997) hanno recentemente sottolineato la necessità di studiare anche danneggiamento che si verifica in presenza di cicli di carico interni alla curva involuppo (*Inner Loops*, Fig. 1b). I loro risultati hanno evidenziato il lento ma progressivo danneggiamento provocato dai cicli interni che può causare la rottura per fatica del provino. Gli autori hanno inoltre osservato che la curva involuppo del provino sottoposto a carichi ciclici è molto vicina a quella della curva discendente post-picco che si ottiene con una prova statica.

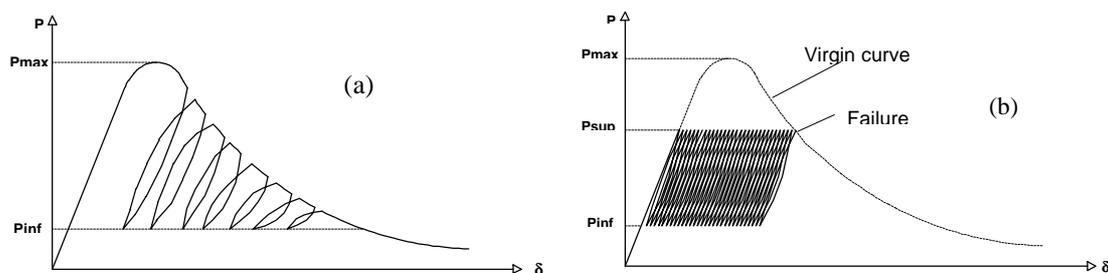


Figura 1: Cicli sulla curva involuppo (a) e cicli interni (b).

Quest'ultimo aspetto potrebbe essere particolarmente significativo per i calcestruzzi fibrorinforzati, caratterizzati da resistenze residue dopo la fessurazione sensibilmente maggiori dei corrispondenti calcestruzzi senza fibre. L'impiego delle fibre nel calcestruzzo può risultare ancor più efficace per i calcestruzzi ad alta resistenza che, a causa della natura intragranulare della fessura, sono caratterizzati da un comportamento post-picco particolarmente fragile. Proprio in questi calcestruzzi, l'impiego delle fibre, con l'incremento di duttilità che esse comportano, rendono il materiale un calcestruzzo ad alte prestazioni. Scopo del presente lavoro è lo studio sperimentale del comportamento di calcestruzzi ad alta resistenza e fibrorinforzati in presenza di carichi ciclici. In particolare vengono considerati calcestruzzi di ordinaria resistenza con fibre di acciaio (NS-SFR) e calcestruzzi ad alta resistenza senza fibre (HSC), con fibre di acciaio (HSC-SFR) e con fibre di carbonio (HSC-CFR). Al fine di poter studiare il comportamento del materiale, sono state effettuate prove di trazione diretta su provini cilindrici. Infatti, i risultati delle prove su semplici elementi strutturali, come ad esempio le travi, sono influenzati dall'effetto scala, tipico del comportamento a frattura del calcestruzzo (Carpinteri, 1989); tali risultati, di conseguenza, non possono essere completamente rappresentativi per il materiale.

PARTE SPERIMENTALE

La Tabella 1 mostra la composizione e le resistenze cilindriche a compressione ed a trazione dei quattro tipi di calcestruzzo utilizzati dopo 28 giorni di maturazione in acqua; per favorire il confronto, la tabella riporta anche i dati relativi al calcestruzzo di normale resistenza (NSC) utilizzato in un precedente studio sperimentale da Plizzari, Cangiano e Alleruzzo (1997).

Tabella 1: Caratteristiche dei calcestruzzi impiegati nelle prove sperimentali.

Materiale	Tipo Cemento	Cemento [kg/mc]	Acqua [l/mc]	a/c	Fibre [kg/mc]	Aggregati [kg/mc]	Slump [cm]	f _c [MPa]	f _{ct} [MPa]
NSC	32.5	370	207	0.56	-	1794	13	45.4	4.01
NSC-SFR	32.5	370	219	0.59	30.0	1748	13	27.8	4.31
HSC	52.5	550	160	0.29	-	1711	20	102.0	5.16
HSC-SFR	52.5	550	160	0.29	30.0	1701	17	106.4	5.57
HSC-CFR	52.5	550	160	0.29	6.7	1698	10	96.5	5.18

Il cemento utilizzato per il calcestruzzo di normale resistenza è di Tipo II/A - L 32.5 R mentre quello utilizzato per i calcestruzzi ad alta resistenza è di Tipo I 52.5 R. Tutti i calcestruzzi ad alta resistenza sono stati confezionati impiegando anche fumo di silice con un dosaggio di 550 kg/mc. Le fibre di acciaio utilizzate sono le Dramix ZP 30/50, prodotte mediante trafilatura a freddo dalla ditta belga Bekaert; le fibre di carbonio utilizzate sono fibre poliacrilonitriliche (PAN) RK10 prodotte dalla ditta inglese RK Carbon Fibres. Per favorire il confronto, il dosaggio impiegato è stato pari a 0.38% (in volume) per entrambi i tipi di fibra. I provini hanno forma cilindrica con un diametro di 80 mm ed un'altezza di 210 mm (Fig. 2). Essi sono stati intagliati, mediante una tornitura meccanica, lungo la circonferenza nella sezione di mezzeria, allo scopo di ridurre la sezione resistente e forzare così l'innesco della fessura nella sezione centrale del provino. L'intaglio ha forma triangolare con angolo di 90° per una profondità di 4 mm (5% del diametro); di conseguenza, la sezione resistente ha un diametro netto di circa 72 mm (Fig. 2). Il rapporto altezza/diametro netto, pari a circa 3, è sufficiente per evitare la presenza di sforzi tangenziali, dovuti alla contrazione impedita nelle sezioni di estremità, nella sezione di rottura. La strumentazione impiegata consente di rilevare l'apertura della fessura, l'emissione acustica ed il carico applicato al provino. I segnali analogici provenienti dai diversi strumenti sono tutti collegati alla scheda di conversione analogico-digitale installata in un PC. e quindi letti e memorizzati sul disco fisso. L'apertura di fessura, o più precisamente lo spostamento relativo tra due sezioni alle estremità dell'intaglio poste ad una distanza di 30 mm, è rilevata attraverso tre trasduttori di spostamento induttivi LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), disposti a 120° lungo la circonferenza del provino (Fig. 2). Tra gli LVDT sono applicati tre *clip gauges* (trasduttori di spostamento resistivi a ponte intero), aventi la duplice funzione di misurare l'apertura della fessura e di fornire il segnale di retroazione per il controllo della prova. I tre *clip gauges* sono collegati in parallelo in modo da ottenere direttamente il segnale analogico medio ed hanno una sensibilità di 0.1 µm/mV. A causa della lunghezza molto limitata della base, la misura degli LVDT e dei *clip gauges* riguarda prevalentemente l'apertura della fessura, a meno di pochi micron legati alla deformazione

elastica del materiale; per tale motivo la prova può essere considerata in controllo di apertura di fessura (o di COD: *Crack Opening Displacement*). I supporti degli LVDT e dei *clip gauges* sono realizzati in alluminio in modo da essere sufficientemente rigidi e leggeri per ridurre la superficie di incollaggio sul provino.

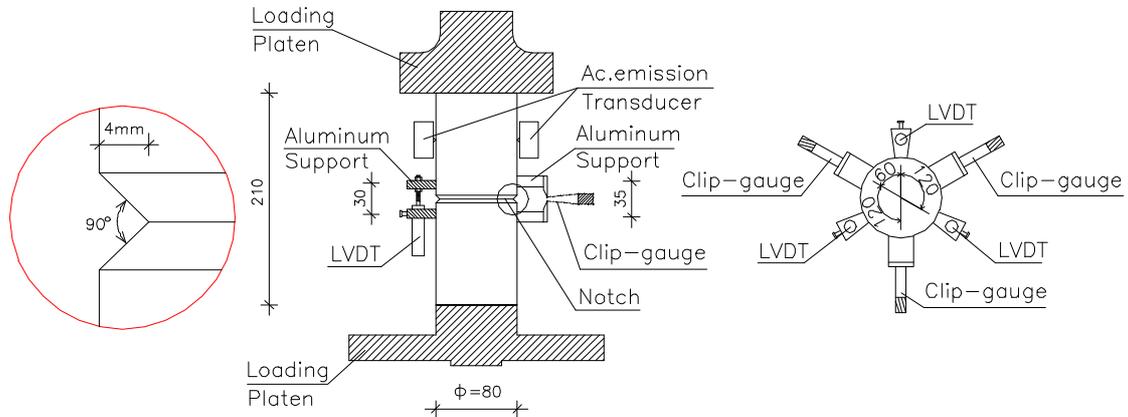


Figura 2: Schema del provino cilindrico e della strumentazione impiegata.

In tutte le prove è stata rilevata l'Emissione Acustica in termini di conteggio cumulativo di eventi acustici, linearizzato in output su una scala 0÷10 V. Tale misurazione ha lo scopo di mettere in relazione l'evoluzione del danneggiamento nel provino con l'incremento dell'attività acustica. Quest'ultima è rilevata da due sensori messi a contatto col provino in posizione diametralmente opposta ed impiegando grasso siliconico come mezzo di accoppiamento (Fig. 2). Tali sensori, collegati alla centralina di acquisizione ed elaborazione del segnale, sono più o meno sensibili al rumore in base all'amplificazione che si sceglie, posta pari a 25 dB nelle prove effettuate.

La macchina di prova utilizzata per la sperimentazione è stata costruita presso l'Officina Meccanica Italcementi. La principale caratteristica della macchina è la sua notevole rigidità che risulta di primaria importanza per le prove di trazione diretta; la pressa è inoltre dotata di servocontrollo idraulico gestito da una centralina elettronica MTS. Il carico è stato misurato per mezzo della cella di carico da 200 kN dotata di una sensibilità di 25 N/mV.

MODALITA' DI PROVA

Lo studio del comportamento a fatica del calcestruzzo deve essere effettuato in presenza della zona di processo. A tale scopo l'applicazione dei carichi ciclici è iniziata dopo aver raggiunto il carico di picco, in modo da verificare il comportamento del materiale nelle zone in cui subisce il maggior danneggiamento durante l'applicazione dei carichi ciclici. Lo studio completo del materiale richiede la caratterizzazione del suo comportamento sia durante i cicli interni che durante i cicli sulla curva iniluppo. Ciascuna prova ciclica è suddivisa nelle seguenti quattro fasi, completamente gestite da un *software* appositamente sviluppato per il controllo della prova (Plizzari et al., 1997; Fig. 3a).

Fase iniziale monotona (OAB): lo spostamento viene applicato monotonamente fino al raggiungimento del carico di picco P_{max} ; quando inizia la fase discendente della curva

carico-spostamento; in corrispondenza di un carico pari a $k_1 \cdot P_{max}$ ($k_1=0.95$), il provino viene scaricato fino alla soglia inferiore P_{inf} della successiva fase ciclica.

Fase ciclica (BC): vengono applicati cicli di carico tra un livello inferiore P_{inf} ed un livello superiore P_{sup} , scelto in modo tale che i cicli rimangano sotto la curva inviluppo. Il controllo di *COD* consente, una volta raggiunta la curva inviluppo discendente, di avere un comportamento stabile della prova. Il controllo sul carico viene fatto dal *software* che provvede ad invertire il segno della velocità di *COD* ogni volta che vengono raggiunte le previste soglie di carico superiore e inferiore.

Fase ciclica sul ramo softening (CD): il carico viene applicato ciclicamente tra la soglia inferiore P_{inf} e la curva inviluppo. La fase ciclica termina quando il carico di picco P_{max1} del singolo ciclo è inferiore ad valore minimo pari a $k_5 \cdot P_{inf}$ (k_5 e' stato assunto pari a 1.20 per tutte le prove).

Fase finale monotona (DE): lo spostamento viene applicato in modo crescente fino a quando il carico non risulta inferiore a circa l'1% del carico massimo registrato durante la prova (P_{max}), dopo di che la prova viene interrotta manualmente.

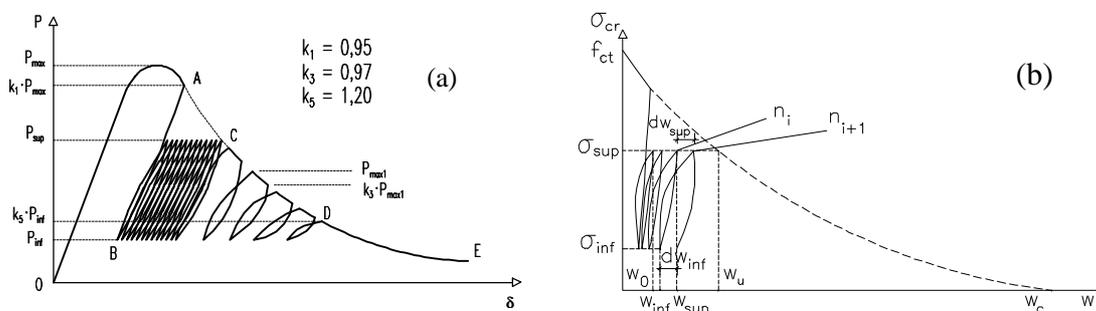


Figura 3: Diagramma carico-spostamento per una generica prova ciclica(a); incremento di apertura di fessura durante l'applicazione dei cicli interni (b).

RISULTATI SPERIMENTALI

Allo scopo di studiare il comportamento a fatica con basso numero di cicli, tutte le prove sono state condotte con un carico variabile tra il 25 e il 75% del carico massimo effettivamente misurato sul provino (durante la fase dei cicli interni).

La Figura 4a mostra una tipica curva del carico in funzione dell'apertura media della fessura, ottenuta da un provino di normale resistenza con fibre di acciaio. Si può notare l'incremento di *COD* che si verifica sia durante l'applicazione dei cicli interni al provino che durante i cicli sulla curva inviluppo. Una misura del danneggiamento e' fornita dalla curva dell'Emissione Acustica cumulativa che e' caratterizzata da una pendenza quasi nulla nella fase dei cicli interni e da un incremento di pendenza in corrispondenza del raggiungimento della curva inviluppo; essa evidenzia che il danneggiamento del materiale si verifica prevalentemente nella fase ciclica sulla curva inviluppo. Diverso e' il comportamento di provino strutturale; la Figura 4b mostra infatti i risultati di una prova ciclica effettuata dagli stessi autori, con le stesse soglie di carico, su un provino di trave (Plizzari, Cangiano e Cere, 1996); si può notare come, durante la fase dei cicli interni, si verifichi un incremento significativo dell'emissione acustica, a dimostrazione del fatto che, nella zona di processo, il materiale sta gia' percorrendo la curva inviluppo.

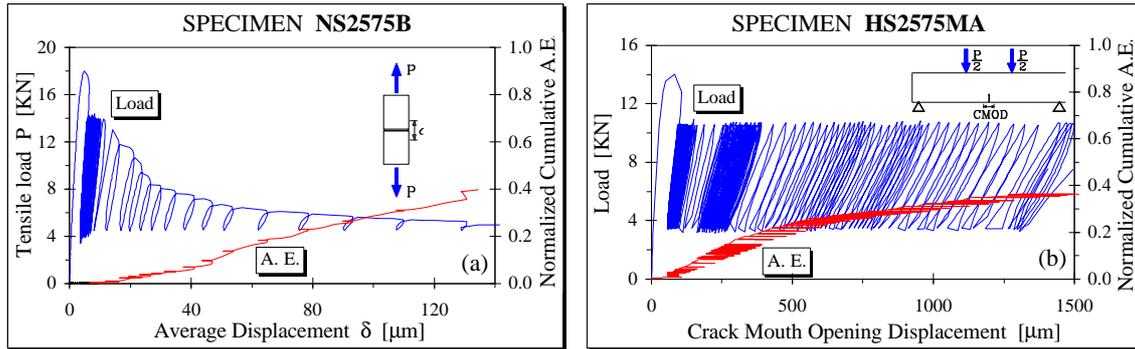


Figura 4: Diagramma carico spostamento ottenuto da un provino cilindrico (a) e da un provino di trave (b).

La Tabella 2 riporta le caratteristiche geometriche ed i principali risultati sperimentali ottenuti dai diversi provini sottoposti a prove cicliche; in particolare la tabella mostra la resistenza a trazione f_{ct} , ottenuta dividendo il carico massimo (P_u) per la superficie resistente del provino, l'apertura di fessura al raggiungimento del carico massimo (δ_p), l'apertura di fessura alla fine della fase monotona finale (δ_c), il numero di cicli interni (N_{max}), il numero totale di cicli (N_{tot}), l'Emissione Acustica cumulativa alla fine della prova, il tipo di frattura nel calcestruzzo (transgranulare o intragranulare) ed il numero di fibre di acciaio sulla superficie di frattura (le fibre di carbonio non erano visibili sulla superficie di frattura del provino).

Tabella 2: Principali risultati ottenuti dalle prove sperimentali.

SPECIMEN	Nota n.	Φ_R [mm]	Age [days]	freq [Hz]	P_{max} [KN]	f_{ct} [MPa]	P_u [KN]	δ_p [μ m]	δ_c [μ m]	N_{max} [-]	N_{tot} [-]	A.E.·max [-]	Sup. di frattura	
													Fessura	N.° fibre
NS2575A	1	73.15	505	0.5	19.11	4.55	---	---	---	---	---	---	Transg.	17
NS2575B	---	73.70	505	0.5	18.10	4.24	18.10	4.9	5913	2450	2463	2176	Mista	25
NS2575C	---	72.82	506	0.5	17.95	4.31	13.07	5.1	8540	136	152	976	Transg.	16
H2575A	---	73.92	216	0.5	19.95	4.65	14.17	9.9	148	3	11	1981	Intrag.	---
H2575B	2	74.41	216	0.5	24.76	5.69	14.51	6.3	---	0	6	---	Intrag.	---
HS2575A	3	74.39	219	0.5	24.74	5.69	---	---	---	---	---	---	Intrag.	19
HS2575B	4	73.77	220	0.5	21.87	5.12	15.51	4.3	---	5131	5131	---	Intrag.	18
HS2575C	---	74.72	225	0.5	23.35	5.33	17.51	9.7	4487	238	246	4513	Intrag.	14
HC2575A	4	74.80	169	0.5	22.45	5.11	15.10	8.4	---	829	829	---	Intrag.	n.d.
HC2575B	---	73.55	177	0.5	21.82	5.14	15.70	6.7	175	1201	1208	3848	Intrag.	n.d.

Nota⁽¹⁾ Rottura provino fra l'intaglio e la piastra superiore.

Nota⁽²⁾ Fase finale monotona non registrata dal software.

Nota⁽³⁾ Prova divenuta instabile a causa del cedimento di una fibra di acciaio.

Nota⁽⁴⁾ Prova instabile al raggiungimento del ramo softening. Effettuati solo i cicli interni.

La Figura 5a mostra il buon accordo tra la curva involucro ottenuta dalle prove cicliche e la curva carico - COD ottenuta dalle prove statiche su provini di HSC-SFR. Lo stesso comportamento si è verificato anche per gli altri tipi di calcestruzzo impiegati nella sperimentazione e conferma i risultati ottenuti da Plizzari, Cangiano e Alleruzzo (1997) e da Hordijk (1991) che ha attribuito questo fenomeno alla formazione di nuove microfessure durante l'applicazione dei carichi ciclici. Questo fa capire il ruolo delle fibre nel comportamento a fatica del calcestruzzo; queste, aumentando la resistenza residua a

trazione del materiale fessurato, allungano il percorso dell'apertura di fessura che, per raggiungere la curva involuppo, dovrà compiere un numero maggiore di cicli. Naturalmente questo effetto benefico si verificherà in corrispondenza dei tratti di curva influenzati dalla presenza delle fibre; la Figura 5b; relativa alle prove statiche sui calcestruzzi ad alta resistenza, mostra infatti che l'incremento di resistenza residua del calcestruzzo con fibre di acciaio si manifesta in modo evidente quando il carico è inferiore a circa 7 kN (a cui corrisponde una tensione di circa 1.7 MPa). Per valori superiori del carico ciclico massimo, le fibre non comportano un miglioramento significativo della resistenza residua. Naturalmente i valori citati sono strettamente legati al modesto dosaggio di fibre impiegate; infatti, dosaggi maggiori di fibre comportano un incremento della resistenza residua subito dopo il carico di picco e quindi dovrebbero essere in grado di aumentare la resistenza a fatica anche per valori maggiori del carico massimo nella fase ciclica.

Le fibre di carbonio impiegate non hanno offerto incrementi significativi della resistenza residua (Fig. 5b); esse non sono quindi in grado di aumentare in modo rilevante la resistenza a fatica del provino. La notevole resistenza che caratterizza tali fibre richiederebbe però un approfondimento della ricerca per studiare la lunghezza ed il trattamento superficiale ottimale per un loro possibile impiego nel calcestruzzo (Di Tommaso et al., 1991).

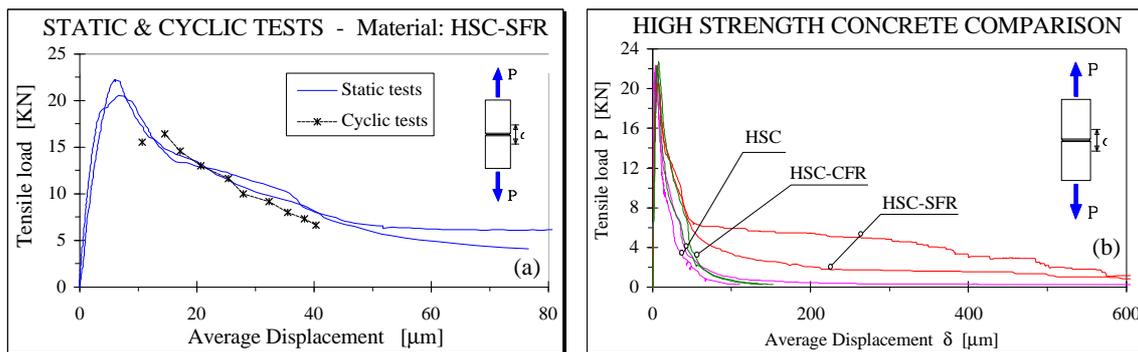


Figura 5: Confronto tra la curva involuppo e la curva delle prove statiche per il HSC-SFR (a); confronto tra le prove statiche sui calcestruzzi ad alta resistenza (b).

La Figura 6 mostra il danneggiamento nei cicli interni dei provini NSC-SFR, espresso come dw_{max}/dn in funzione di w_{max}/w_u (per il significato dei simboli si veda la Fig. 3b). Tale danneggiamento viene confrontato con la curva del modello esponenziale a due parametri proposto da Plizzari, Cangiano e Alleruzzo (1997):

$$\frac{dw_{max}}{dn} = \frac{Ae^{\frac{B \cdot w_{max}}{w_u}}}{1 - \frac{w_{max}}{w_u}}$$

Integrando l'equazione precedente tra l'apertura di fessura in corrispondenza del carico superiore del primo ciclo interno (w_0), e l'apertura di fessura al raggiungimento della curva involuppo (w_u), si determina l'espressione di N_{max} in forma chiusa:

$$N_{\max} = \frac{1}{A} \left(\frac{w_u}{B^2 e^B} - \frac{(w_u - Bw_u + Bw_0)}{B^2 e^{\frac{Bw_0}{w_u}}} \right)$$

I parametri A e B dovrebbero dipendere dal tipo di materiale, dalle soglie di carico applicate e dalla frequenza utilizzata; essi sono stati determinati in modo da ottenere un buon accordo con le curve sperimentali e contemporaneamente avvicinare il più possibile il valore sperimentale di N_{\max} . Nella Tabella 3 sono riepilogati i valori dei parametri A e B ottenuti nelle operazioni di *fitting* sui calcestruzzi fibrorinforzati; i risultati del calcestruzzo ad alta resistenza non rinforzato non sono stati riportati in quanto esso, come precedentemente affermato, ha mostrato una resistenza a fatica praticamente nulla. Come si può notare, il parametro A è risultato di un ordine di grandezza inferiore a quello del NSC (ottenuto da Plizzari, Cangiano e Alleruzzo, 1997), indicando una propagazione più lenta della fessura nel calcestruzzo con fibre di acciaio. Il confronto in termini di $\log(N_{\max})$, spesso adottato per i risultati di prove cicliche, risulta più che soddisfacente. Comunque, considerato il numero limitato di campioni, sono necessarie ulteriori indagini per fornire indicazioni più precise sui valori dei due parametri; le elaborazioni fatte in questo lavoro hanno lo scopo di proporre ed individuare le prime tendenze.

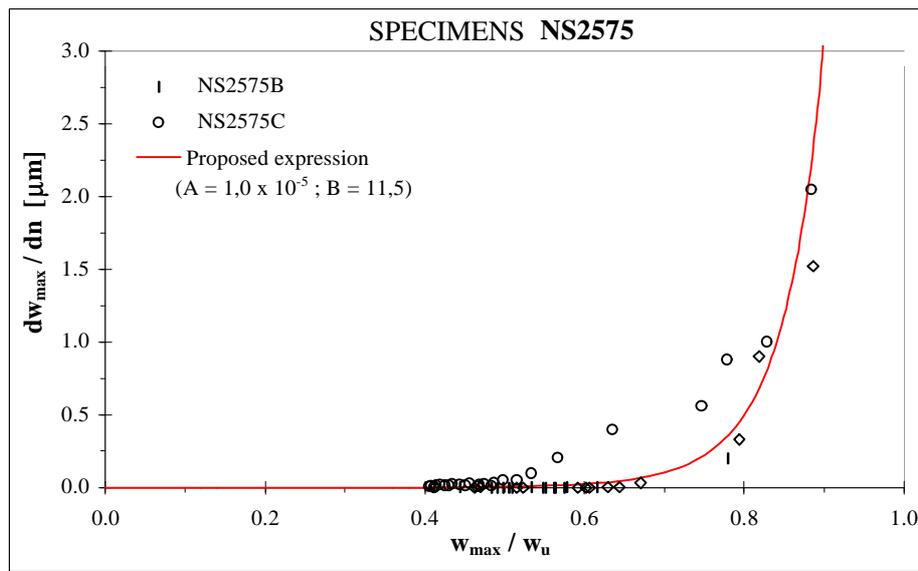


Figura 6 Diagramma dell'incremento di apertura di fessura in funzione di w_{\max}/w_u .

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato affrontato il problema del comportamento di calcestruzzi ordinari con fibre di acciaio, e di calcestruzzi ad alta resistenza senza fibre e con fibre di acciaio e di carbonio, sottoposti a carichi ciclici. A tale scopo, è stata effettuata un'indagine sperimentale con prove di trazione diretta su cilindri per meglio studiare il comportamento del materiale.

I principali risultati sperimentali ottenuti sono riassunti nel seguito.

La curva involuppo delle prove cicliche è risultata quasi sovrapponibile a quella determinata con le prove monotone statiche per tutti i tipi di calcestruzzo.

I valori elevati del massimo carico nella fase ciclica (75% di P_{max}) non hanno evidenziato significativi contributi della presenza di fibre nei confronti della resistenza a fatica. Questo comportamento è dovuto al modesto dosaggio di fibre impiegato che non influenza il tratto iniziale del ramo discendente della curva carico-apertura di fessura. Maggiori dosaggi di fibre dovrebbe consentire un miglioramento del comportamento a fatica dei provini anche per valori maggiori del carico.

Tabella 3: Confronti tra il modello di danneggiamento ed i risultati sperimentali.

Specimen	w_0	w_u	A	B	N_{max}	N_{max}	$\log(N_{max})$	$\log(N_{max})$
	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	Experim.	Theory	Experim.	Theory
NC75/25A	5	20	1.0E-04	8	645	2116	2.81	3.33
NC75/25B	5	12	1.0E-04	8	344	246	2.54	2.39
NC75/25E	1	12	1.0E-04	8	5081	6097	3.71	3.79
NS2575B	5	14	1.0E-05	11.5	2450	1114	3.39	3.05
NS2575C	8	17	1.0E-05	11.5	136	292	2.13	2.47
HS2575B	4	11	1.0E-05	10	5131	1555	3.71	3.19
HS2575C	7	14	1.0E-05	10	238	378	2.38	2.58
HC2575A	8	15	1.0E-05	11	829	145	2.92	2.16
HC2575B	7	13	1.0E-05	11	1201	117	3.08	2.07

La percentuale (0.38% in volume) ed il tipo di fibre poliacrilonitriliche adottate nel calcestruzzo ad alta resistenza (lunghezza 20 mm) non hanno conferito al materiale una significativa duttilità, avendo fornito curve statiche poco discoste da quelle del calcestruzzo ad alta resistenza senza fibre.

Durante l'effettuazione dei cicli interni si verifica un progressivo danneggiamento del materiale che, se espresso in termini di dw_{max}/dn , cresce molto rapidamente quando lo spostamento w_{max} si avvicina alla curva involuppo. I risultati sperimentali sono stati confrontati con il modello esponenziale di danneggiamento, fornendo prime indicazioni sui valori dei parametri da adottare per i calcestruzzi fibrorinforzati. Tali parametri evidenziano la minor velocità di propagazione della fessura nei calcestruzzi rinforzati con fibre metalliche.

BIBLIOGRAFIA

Carpinteri, A., 1989. "Size Effects Strength, Toughness, and Ductility", *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 115, pp. 1375-1392.

Cornelissen, H.A.W., 1986, "State of the Art Report on Fatigue of Plain Concrete", *Stevin Report 5-86-3*, Delft University of Technology, 62 pp., v. anche Chapter 3 "Fatigue Performance of Concrete", *CEB Bulletin N° 188*, 1988.

Di Tommaso, A., G. Mantegazza e A.M. Penna, 1991, "Ottimizzazione della tenacità di compositi cementizi carbo-fibrosi", *AICAP '91*, SPOLETO.

Hordijk, D.A., 1991 "Local approach to Fatigue of Concrete", *Doctoral Thesis*, Delft University of Technology.

Plizzari, G.A. , S. Cangiano e N. Cere, 1996, "Studio sperimentale sul comportamento fessurativo di calcestruzzi ad alta resistenza e fibrorinforzati sottoposti a carichi ciclici", Università' di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile, *Technical Report N. 5.6*.

Plizzari, G.A., S. Cangiano e S. Alleruzzo, 1997, "The Fatigue Behaviour of Cracked Concrete", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, in corso di pubb.

Slowik, V. , G.A. Plizzari e V.E. Saouma, 1996, "Fracture of Concrete under Variable Amplitude Loading", *ACI Materials Journal*, 93(3), pp.272-283.

Wittmann, F.H. , 1995, *Proceedings of the Second International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures*, Aedificatio, Zurich, 25-28 Luglio.

Yankelevsky, D.Z. e H.W. Reinhardt, 1989, "Uniaxial Behaviour of Concrete in Cyclic Tension", *ASCE Journal of Structural Engineering*, 115(1), pp. 166-182.