

FATICA MONOASSIALE E FRATTURA DEL CALCESTRUZZO

Ezio Dolara

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di
Roma "La Sapienza", Via Eudossiana 18 00185 Roma*

SOMMARIO: Si effettuano prove sperimentali di frattura del tipo TBP (Three-Point-Bending) su prismi di calcestruzzo affaticato fino a 12 milioni di cicli pulsanti in compressione. Si rilevano le caratteristiche tensionali e deformative. I risultati vengono corretti da errori di rilevamento e si valuta l'energia di frattura G_f con la metodologia RILEM, riportando infine l'energia di frattura in funzione del numero di cicli N di compressione monoassiale.

PAROLE CHIAVE: fatica, monoassiale, laboratorio, energia di frattura, pulsatore, calcestruzzo, frattale.

INTRODUZIONE

Le prove di frattura si effettuano sia su campioni di calcestruzzo vergine che su campioni già affaticati in compressione, mediante carichi ripetuti per un elevato numero di cicli (HCF = High Cycle Fatigue). Il piano di frattura è ortogonale alla direzione del carico monoassiale di fatica. Il range delle tensioni viene mantenuto entro i limiti di lavoro previsto dalla normativa vigente, che si aggira intorno ad $1/3$ della resistenza ultima per carichi assiali di compressione.

EQUIPAGGIAMENTO DI LABORATORIO

Per le prove di fatica si usano: un pulsatore idraulico AMSLER tipo 131-130 tarato a 28 kg/cm², con fondo scala di 600 cicli/min; una pressa per pulsatore METRO COM con scale 10,20,50,100 t e sensibilità di $\pm 2\%$. Per le prove di frattura si usa una pressa Mohr & Federhoff con scale 100,250,500 t e sensibilità di $\pm 1\%$. Per le misure tensionali e deformative si utilizzano estensimetri resistivi posti in direzioni ortogonali tra loro, del tipo PL-30-11 con resistenza $120 \pm 0.3 \Omega$, lunghezza 60mm e trasduttori di spostamento induttivi del tipo HBM Induktive W10-W200, con spostamento massimo di ± 10 mm e sensibilità di ± 7 mm. La fase di acquisizione e controllo si effettua mediante un Data Acquisition/Control Unit HP 3852A a 72 Canali e numero max di 100000 letture/sec. Seguendo un rigoroso protocollo si preparano cinque prismi di dimensioni 15x15x30.5 cm ed otto cubi di dimensioni 10x10x10 cm, per un volume totale di circa 0.042 m³. Si perseguono la massima omogeneità e densità del provino con un preciso mix-design.

Provini	(pesate per 0.01 mc)	
Cemento 425 Ptl	3.500 Kg	Slump = 2.3 cm
Inerte 0-2	5.150 Kg	Tcls = 15.0 °C
Inerte 2-7	4.440 Kg	Tamb = 19.5 °C
Inerte 7-12.5	3.020 Kg	UR = 64%
Inerte 12.5-20	5.150 Kg	
Acqua (A/C=0.6)	2.100 Kg	
	<hr/>	
	23.360 Kg	

Gli strumenti sono messi a punto mediante un taratore di segnale Huggenberger. I segnali sono amplificati da un HBM KWS Darmstadt del tipo 3071 per gli strumenti resistivi e del tipo 3070 per gli strumenti induttivi.

Tabella 1: Calcestruzzo e resistenze caratteristiche da 1 a 28 gg.

	Rck (Kg/cmq)			
	1g	3g	7g	28g
CR1	72/75	159/159	221/222	328/325

PROVE DI FATICA

Mediante l'equipaggiamento illustrato, i campioni prismatici si sottopongono ad elevato numero di cicli di carico pulsante, prova denominata Fatica HCF (High Cycle Fatigue), alla frequenza di 450 cicli/min e con escursione compresa fra 10t e 30t con un carico che agisce lungo la direzione dell'asse maggiore del provino (fig.1). Tra le piastre della pressa e il campione in calcestruzzo viene posta una lastra di piombo di 5 mm al fine di limitare le concentrazioni di sforzi nei punti di maggiore rugosità della faccia del calcestruzzo, di eliminare gli attriti tra piastra in acciaio e provino, di limitare

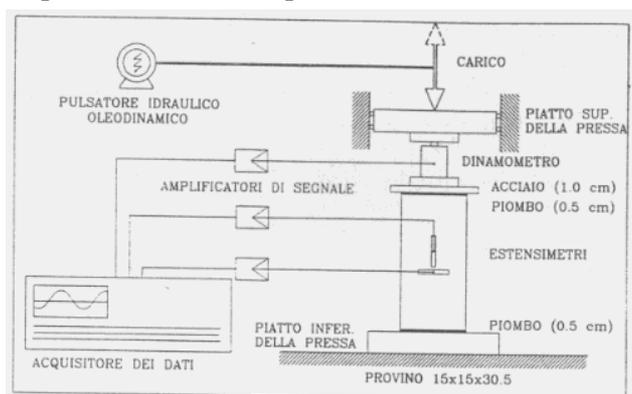


Figura 1: Schema delle strumentazioni di prova a fatica.

l'effetto di shock di impatto durante i cicli ad elevata frequenza. La prova di fatica viene protratta fino a 6, 10 e 12 milioni di cicli.

PROVE DI FRATTURA

La prova (fig.2) è a carico monotono crescente fino a ;120 t ed il carico è applicato ad una trave a profilati a doppio T in acciaio, molto più rigida del provino e posta in

parallelo con la stessa. In tal modo è possibile tracciare il "softening branch" del diagramma P-d, mantenendo la prova "a carico controllato" anche nella regione "instabile". Il provino di calcestruzzo è poggiato alle estremità su due rulli di acciaio di diametro $\phi = 48$ mm; nella sua mezzeria viene fatto un intaglio dello spessore di 5 mm e altezza $a = d/2 = 75$ mm, il più vicino possibile alle specifiche RILEM del "Three-point bend test" (50-FMC Committe, 1986). Ma la prova di fatica necessita di provini con rapporti dimensionali un po' differenti da quelli previsti dalle specifiche suddette (fig.3) e l'esecuzione a posteriori dell'intaglio, tramite lama rotante, porta dei leggeri scostamenti tra i valori di a dell'intaglio: 67.5 mm; 72.0 mm; 75.4 mm; 75.1 mm rispettivamente per i TEST 01,02,03,04; rimangono fissi i valori di $L=305$ mm; $l=260$ mm; $d=150$ mm; $b=150$ mm. Un dinamometro tra il provino e la trave in acciaio, rileva il valore del carico (fig.2); due trasduttori ad induttanza rilevano l'apertura dell'intaglio (CMOD) e l'abbassamento δ in mezzeria del provino.

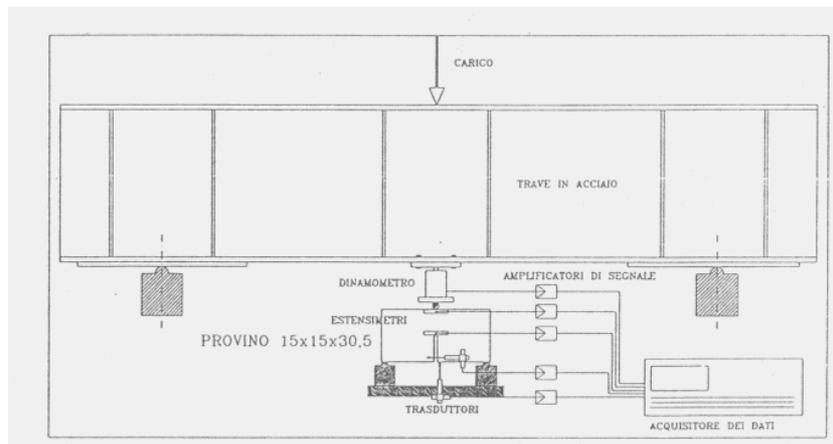


Figura 2: Schema delle strumentazioni di prova a frattura.

La prova di frattura si esaurisce mediamente in 6÷8 secondi ed ha una velocità bassa

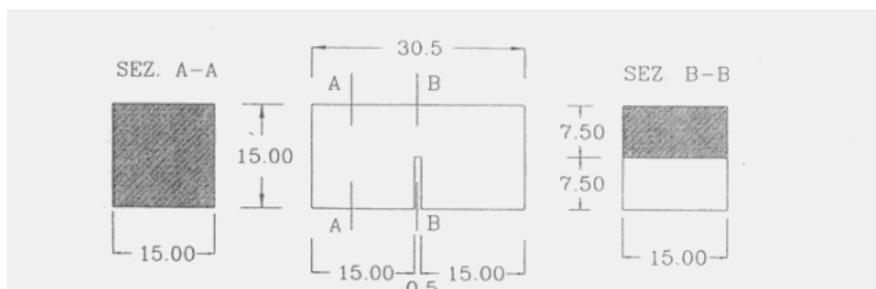


Figura 3: Geometria del provino con intaglio 0.5x7.5 cm.

neri primi 2÷3 secondi, mentre subisce un forte incremento nei successivi 4÷8 sec, passando da 60 kg/sec a 280 kg/sec. La rottura, che è improvvisa, avviene in 2.5 millisc, con una velocità di scarico di circa 520 t/sec ed una velocità di propagazione della frattura di circa 30 m/sec. L'intervallo di scansione del rilevatore è di 0.5 millisc per un totale di 20000 dati su ogni canale di acquisizione e si riescono ad acquisire fino a cinque valori del ramo cadente.

RISULTATI DELLE PROVE

L'acquisitore HP 3852A rileva: il numero, il tipo e i fattori di amplificazione di ciascun canale di acquisizione; la durata dell'acquisizione; l'intervallo di scansione temporale; i dati relativi al carico verticale, alle deformazioni verticali ed orizzontali, all'apertura dell'intaglio (CMOD); i dati relativi all'abbassamento δ in mezzeria.

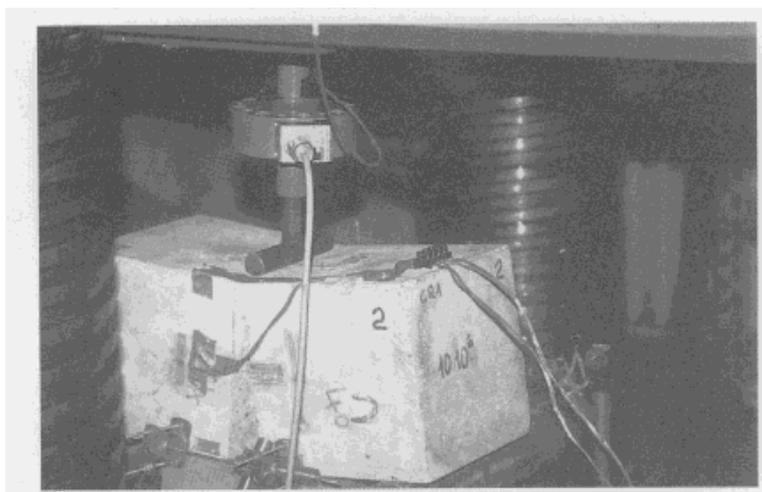


Figura. 4: Prova di frattura sotto la pressa Mohr & Federhoff. Dinamometro resistivo Hottinger.

Le acquisizioni consentono la graficizzazione della forza applicata in funzione del tempo, delle deformazioni orizzontali (trazione e compressione), della apertura dell'intaglio (Crack Mouth Opening Displacements = CMOD), dell'abbassamento δ in mezzeria (figg.5,6).

Facendo riferimento alla prova TPB secondo le modalità RILEM (fig.7), la misura di δ comporta errori per eccesso dovuti all'effetto *punching*, cioè all'affondamento del rullo d'acciaio nel calcestruzzo per la deformazione locale di quest'ultimo. All'aumentare del carico durante la prova, il rullo si spinge all'interno del calcestruzzo, peraltro determinando una superficie di interfaccia sempre sufficientemente ampia da mantenere le pressioni di contatto al di sotto della tensione di plasticizzazione f_p del calcestruzzo. Pertanto si rettificano i valori dell'abbassamento δ , anche per evitare errori nella valutazione dell'energia di frattura (Carpinteri et alii, 1990; Planas, 1989; Swartz, 1992).

Ipotizzando un andamento lineare delle pressioni di contatto $f = \left(1 - \frac{x}{q}\right) \cdot f_p$, per l'equilibrio si ha:

$$F = \int_{-q}^q (f \cdot R \cdot B) dx = 2 \cdot \left(q - \frac{q}{2}\right) \cdot f_p \cdot R \cdot B = q \cdot f_p \cdot R \cdot B, \text{ da cui: } q = \frac{F}{f_p \cdot R \cdot B}; \text{ l'affondamento}$$

del rullo nel calcestruzzo è funzione di q :: $e = R \cdot (1 - \cos q)$; sviluppando in serie la

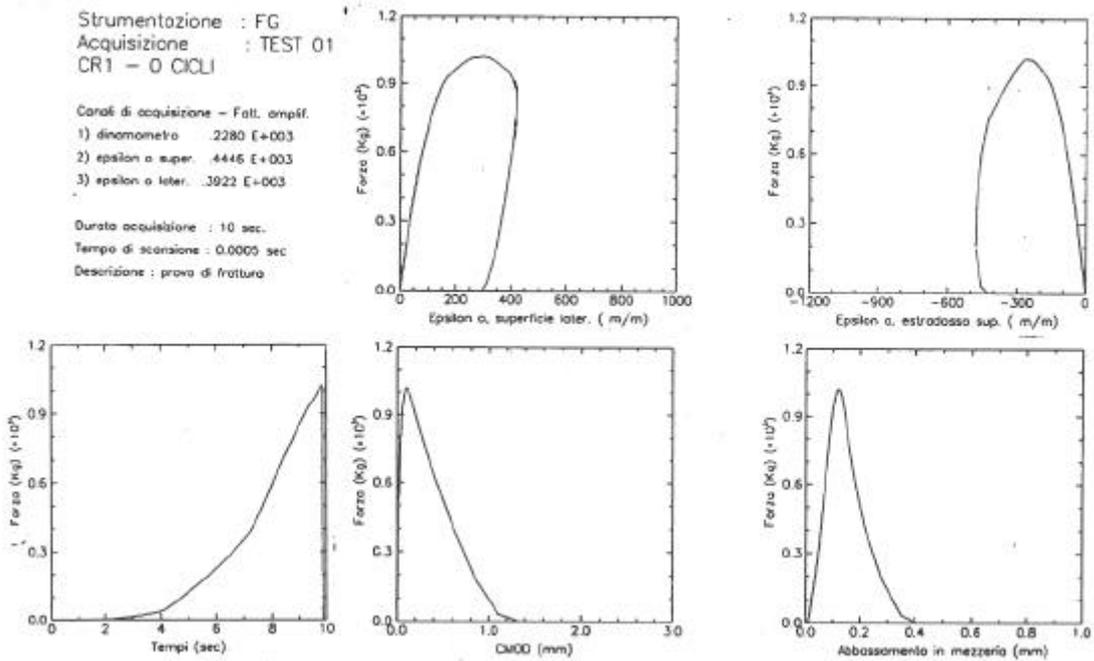


Figura. 5: Rottura del provino CR1 a 0 Mcicli (Milioni di cicli) di fatica.

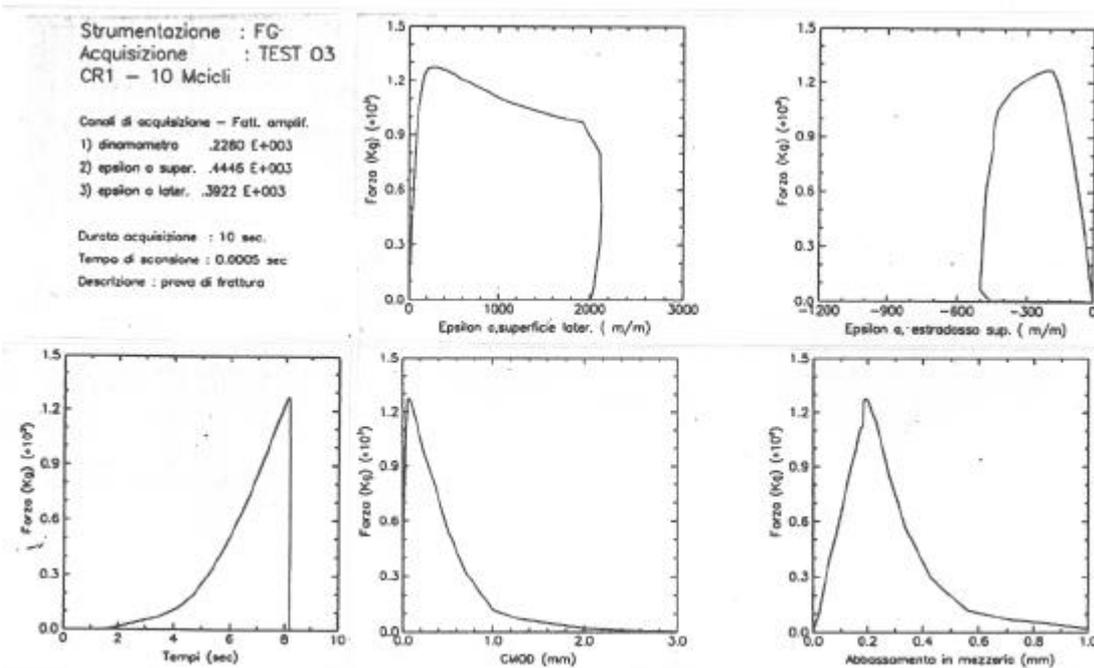


Figura. 6: Rottura del provino CR1 a 10 Mcicli (10 milioni di cicli) di fatica.

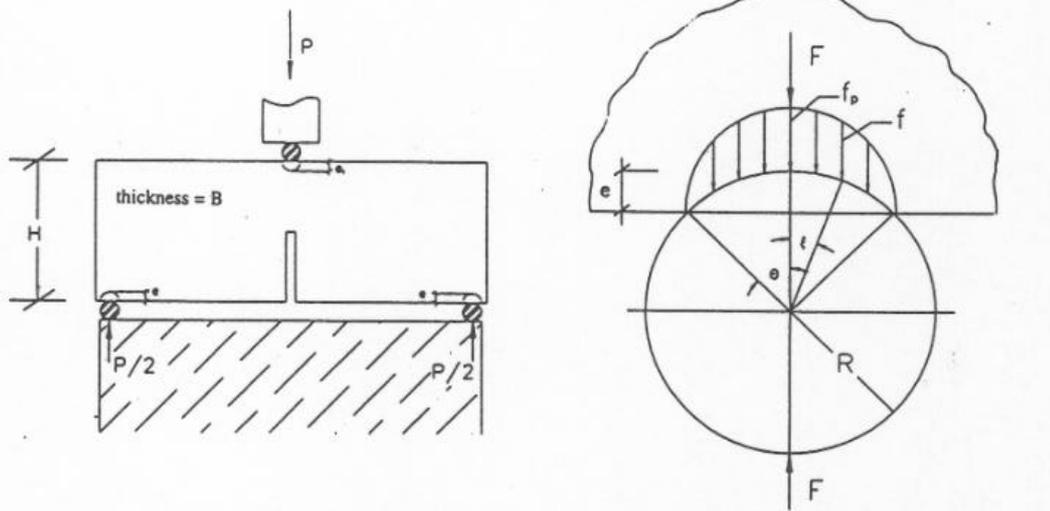


Figura. 7: Schema della prova TPB e pressioni di contatto con il rullo di appoggio

funzione coseno si ha:

$$e \cong \frac{1}{2} \cdot R \cdot q^2 = \frac{F^2}{2 \cdot R \cdot (f_p \cdot B)^2}, \quad e \text{ per simmetria, con buona approssimazione, i rulli di}$$

appoggio ricevono la stessa forza $F = P/2$, per cui si ottiene:

$$e = \frac{1}{8 \cdot R} \left(\frac{P}{f_p \cdot B} \right)^2. \quad (1)$$

Usando per la correzione dell'errore di misura l'espressione (1), si hanno i valori riportati in tabella 2 e graficizzati in fig.8.

Tabella. 2: Valori corretti dell'abbassamento δ .

PROVA	N.cicli	P _{max} (KN)	δ_1 mm	δ_0 mm	e mm	%
TEST 01	0	10.2	0.12	0.39	0.0235	19
TEST 02	6 E+6	11.6	0.15	0.78	0.0304	20
TEST 03	10 E+6	12.7	0.20	1.00	0.0365	18
TEST 04	12 E+6	15.8	0.26	1.47	0.0385	18

Una ulteriore correzione si rende necessaria al fine di uniformare le aree delle zone di frattura (A) che, per errori nell'esecuzione dell'intaglio, hanno valori leggermente differenti che portano a carichi di rottura e ad energie di frattura affette da errori. Per eliminare tale difetto si fa ricorso a semplici considerazioni legate alla meccanica della frattura elastica lineare per la quale si ha:

$$P_{\max} = S_u \cdot \frac{2(b-a)^2}{3} \cdot t; \quad P_{\max} = S_u \cdot \frac{2 h_{\text{lig}}^2}{3} \cdot t; \quad h_{\text{lig}}^2 = S_u \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{t}{1} \cdot P_{\max}$$

Volendo uniformare il carico massimo misurato (P_{\max}^m) ad un carico massimo teorico (P_{\max}^t) relativo ad un valore prefissato di h si propone la proporzione:

$$\frac{P_{\max}^t}{P_{\max}^m} = \left(\frac{h_{\text{lig}}^t}{h_{\text{lig}}^m} \right)^2; \quad P_{\max}^t = \left(\frac{h_{\text{lig}}^t}{h_{\text{lig}}^m} \right)^2 \cdot P_{\max}^m \quad (2)$$

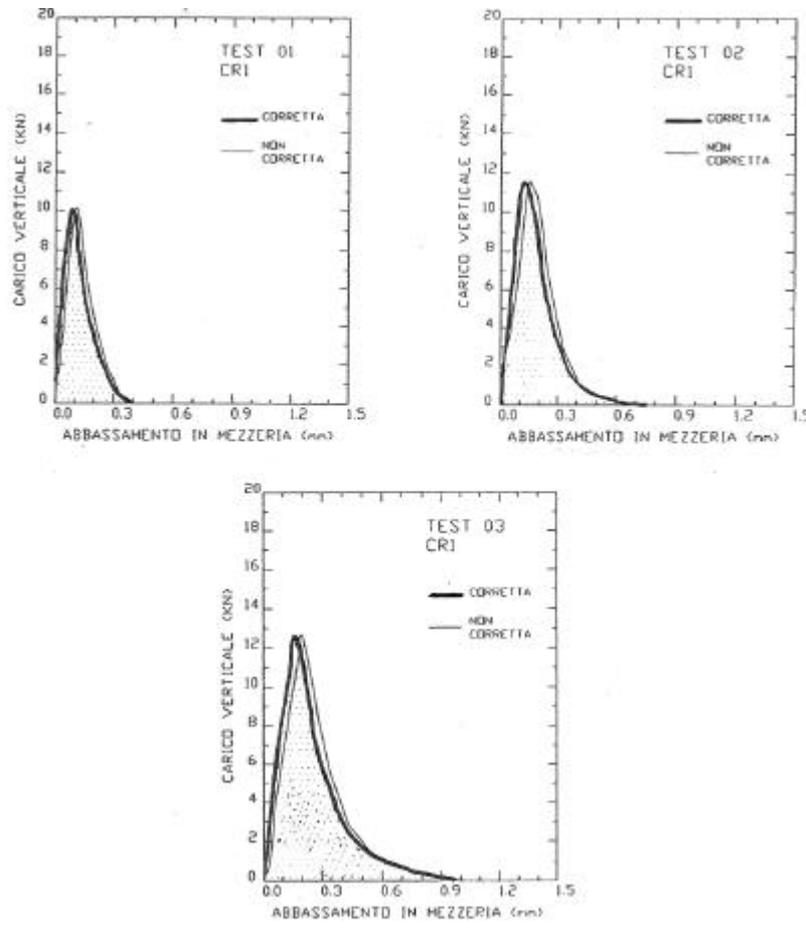


Figure. 8: Diagrammi P- δ corretti

Si procede alla valutazione dell'energia di frattura G_f e del carico ultimo applicato P_{\max} secondo le indicazioni RILEM (50-FMC Committee, 1986; Hillerborg, 1985):

$$G_f = (W_0 + m \cdot g \cdot \delta_0) / (d - a_0) \cdot b, \quad F_{\max} = P_{\max} + m \cdot g / 2 \quad (3)$$

dove: W = area sottesa dalla curva P- δ ; mg = peso del provino entro gli appoggi; δ_0 = abbassamento in mezzeria a rottura.

Tabella 3: Energia di frattura in funzione di N .

PROVA	N.cicli	$m \cdot g$	δ_0 mm	P_{\max} KN	F_{\max} KN	W_0 N · mm	G_f N/mm
TEST 01	0	146.25	0.379	10.2	10.4	1528	0.145
TEST 02	6 E+6	146.25	0.749	11.6	11.8	2457	0.217
TEST 03	10 E+6	146.25	0.964	12.7	12.9	3378	0.286
TEST 04	12 E+6	146.25	1.435	15.8	16.0	4504	0.391

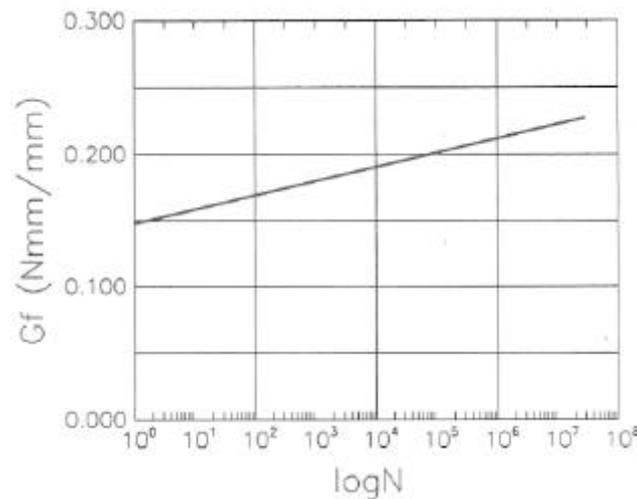


Figura. 9: Energia di frattura in funzione di N , numero di cicli.

Il valore della energia di frattura G_f è notoriamente collegato, per uno stato di deformazione piana nel caso non affaticato, secondo la LEFM, al valore della tensione critica K_{Ic} , critical stress intensity factor or fracture toughness (Perdikaris et alii, 1986; Rossi et alii, 1991; Srawley, 1976):

$$G_f = \frac{K_{Ic}^2}{E \cdot (1 - \nu^2)}, \quad \text{con:} \quad (4)$$

$$K_{Ic} = s \cdot (\sqrt{p l}) \cdot f(l/d);$$

$$f(l/d) = \sqrt{\frac{2d}{p l} \operatorname{tg} \frac{p l}{2d}} \left[\frac{0.923 + 0.199 \cdot \left(1 - \sin \frac{p l}{2d}\right)^4}{\cos \frac{p l}{2d}} \right]$$

dove: $\nu = 0.15$ modulo di Poisson per il calcestruzzo; l = intaglio; d = altezza del provino; $f(l/d)$ = fattore geometrico di correzione (per la flessione) secondo la definizione di Tada (et alii, 1973).

La variazione dell'energia di frattura con la fatica può essere il riflesso di due fenomeni: il primo è un incremento dell'energia di frattura dovuto all'incremento della dimensione della zona di processo del microcrack: più ampie dimensioni dei microcracks formano zone più ampie affette da danno accumulato. La comparsa di microcracks che circondano la punta del crack principale, smussa gli effetti delle tensioni più elevate e più elevato diviene il totale dell'energia necessaria per la rottura completa. Si potrebbe parlare di un microdanno che fa quasi da scudo alla propagazione del crack principale, cioè che frena la propagazione.

Il secondo è l'eterogeneità del materiale: il conglomerato ha infatti un campo di resistenza puntuale interna con distribuzione random.



Figura. 10: Superficie di frattura. Si possono notare intere zone di "scollature" di inerti anche grandi e notevoli "asperità", indice di deviazioni del piano medio teorico di frattura: è evidente la superficie frattale.

Tale modalità di propagazione della frattura ha come risultato una natura molto tortuosa ed accidentata, cioè marcatamente frattale, della superficie effettiva di frattura. Pertanto sembra venir meno il concetto tradizionale di sezione di frattura, che non è piana come convenzionalmente assunto, ma è una superficie molto irregolare e rugosa formata da traiettorie di frattura sghembe, prodotta da continue deviazioni dalle ipotetiche traiettorie rettilinee giacenti su un unico piano. Se la distribuzione casuale dei difetti più deboli che devono essere attivati per ottenere la frattura, viene corretta da una crescita fortemente orientata degli stessi, ciò può dar luogo ad un percorso di frattura obbligato a seguire una maggiore tortuosità, giustificando un sostanziale aumento dell'energia di frattura. Infatti le microfratture "orientate" per fatica monoassiale sono certo di maggiori dimensioni rispetto a quelle "random" iniziali: esse "inglobano" (con il processo di *coalescenza*) alcune di quelle originarie e ne formano una sola più grande. Quest'ultima essendo fortemente più orientata di quelle originarie, può costringere a percorsi più lunghi di frattura. Dai dati sperimentali per il calcestruzzo si può dedurre una variazione lineare dell'energia di frattura G_f :

$$G_f = 0.0235 \cdot \log N + 0.145 \quad (5)$$

che consente di definire l'energia di frattura all'aumentare del numero dei cicli N di compressione pulsante monoassiale.

CONCLUSIONI

Con la fatica le zone di processo e di microdanno si ampliano spesso con direzioni preferenziali. In particolare la prova di fatica in compressione monoassiale produce un equiorientamento nella crescita e coalescenza delle microfratture nella direzione della fatica stessa, sia di quelle originarie che di quelle del bridging. Tali modalità di crescita "attenuano" fortemente le potenzialità del microcrack di svilupparsi anche in altre

direzioni. Si può ipotizzare così che l'energia di frattura possa aumentare se i percorsi di frattura divengono più tortuosi, formando così una superficie frattale. Si può osservare come l'energia G_f aumenti in modo lineare con il logaritmo del numero dei cicli di compressione ($\log N$), ciò che può essere imputabile ad una sorta di *incrudimento* della frattura per la *modalità monoassiale* con cui si esegue la prova preliminare di fatica.

BIBLIOGRAFIA

Carpinteri, A., 1982, "Application of Fracture Mechanics to Concrete Structures", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No.ST4, pp.833-848.

Hillerborg A., 1985, "The Theoretical Basis of a Method to determine the Fracture Energy G_f of Concrete", RILEM Technical Committee 50.

Karihaloo, B.L., Nallathambi, P., 1991, "Notched beam test: mode I fracture toughness", RILEM Report 5 89-FMT Chapman and Hall.

Li, V.C., Bazant, Z.P., 1989, "Fracture mechanics: Application to concrete", ACI SP-118 - Detroit.

Mihashi, H., Takahashi, H., Withmann, F.H., 1989, "Fracture toughness and fracture energy", A.A. Balkema Rotterdam.

50-FMC COMMITTEE, 1986, "Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams", RILEM Draft Recommendation.

Planas J., Elices M., 1989, "Conceptual and Experimental Problems in the Determination of the Fracture Energy of Concrete", Fracture Toughness and Fracture Energy: Test Methods for Concrete and Rock, Edited by H. Mihashi, H Takahashi and F.H. Wittmann, A.A. Balkema, Rotterdam.

Perdikaris, P.C., Calomino, A.M., and Chudnovsky, A., 1986, "Effect Fatigue on Fracture Toughness of Concrete", Journal of Engineering Mechanics, Vol.112, No.8.

Rossi, P., Brühwiler, E., Chhui, S., Jenq, Y.S., Shah, S.P., 1991, Fracture properties of concrete a determined by means of wedge splitting tests and tapered double cantilever beam tests", RILEM Report 5 89-FMT - Chapman and Hall.

Shah, S.P., Carpinteri, A., 1991, "Fracture Mechanics test methods for concrete", Chapman - Hall - 1991.

Swartz S.E., Kan Y.C., 1993, "Effect of Support Conditions on Fracture Energy Measurements for Concrete Beams", ECF 8, Fracture Behaviour and Design of Materials and Structures.

Tada, H., Paris, P.C., and Irwin, G.R., 1973, "The Stress Analysis of Cracks Handbook", Del Research Corporation.

Xu, S., Zhao, G., 1989, "The determination of the fracture toughness and the fracture energy of concrete, from Fracture Toughness and Fracture Energy", Balkema, Rotterdam.