

IGF 11 - XI Convegno Nazionale
Gruppo Italiano Frattura
Brescia, 4-6 Luglio 1995

**COMPORTAMENTO DEL CALCESTRUZZO FESSURATO
IN PRESENZA DI CARICHI CICLICI DI AMPIEZZA
VARIABILE**

Giovanni A. Plizzari

Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Brescia

Victor E. Saouma

Dept. of Civil Environmental & Architectural Engineering, University of
Colorado, Boulder, CO, USA

Volker Slowik

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (FH), Germania

Sommario

Il comportamento del calcestruzzo fessurato sottoposto a carichi ciclici è legato al danneggiamento che si verifica prevalentemente nella zona di processo e quindi viene a dipendere dalle proprietà di frattura del materiale, dalla geometria, dalle dimensioni e dalla storia di carico a cui il provino è sottoposto. Il problema andrebbe studiato con la meccanica della frattura non lineare del calcestruzzo, ma richiederebbe un impegno computazionale tale da rendere proibitivo il suo impiego nella pratica progettuale. Nel presente lavoro viene proposto un modello semplificato di propagazione della fessura valido nell'ambito della meccanica della frattura lineare. Tale modello viene confrontato con i risultati di diverse prove sperimentali.

1 Introduzione

Il comportamento a fatica del calcestruzzo ha suscitato negli ultimi anni un crescente interesse da parte dei ricercatori. Diversi motivi hanno portato a questa crescita di interesse; tra questi si potrebbe citare l'inizio dell'impiego del calcestruzzo per la realizzazione di particolari strutture soggette a carichi dinamici come il vento o le onde marine, oppure l'uso di calcestruzzi ad alta resistenza che ha portato ad avere strutture sempre più snelle nelle quali il peso proprio costituisce una percentuale minore del carico totale. A questi motivi si deve aggiungere il fatto ormai ben noto che nel calcestruzzo sottoposto a carichi ciclici si verifica un danneggiamento del materiale [1];

questo danneggiamento ha luogo prevalentemente in corrispondenza di fessure o microfessure, spesso già presenti al momento della realizzazione della struttura a causa di elevati gradienti termici o di fenomeni di ritiro, come nel caso delle dighe di calcestruzzo.

In prossimità dell'apice di una fessura in una struttura di calcestruzzo è presente una zona danneggiata, definita zona di processo, caratterizzata da un'intensa microfessurazione ed avente dimensioni che dipendono dal tipo di calcestruzzo impiegato, dalle dimensioni del provino e dal livello di carico a cui il provino è sottoposto. I risultati di prove sperimentali effettuate da diversi ricercatori hanno evidenziato che il danneggiamento del calcestruzzo sottoposto a carichi ciclici avviene prevalentemente nella zona di processo e poco nel materiale non danneggiato [2]. Risulta quindi evidente che il comportamento a fatica del calcestruzzo viene a dipendere da fattori che influenzano la formazione e le dimensioni di tale zona e quindi dal materiale impiegato, dalle dimensioni della struttura [3, 4] e dalla storia e velocità di carico a cui la struttura è sottoposta [5].

Sulla base delle considerazioni precedenti, è intuibile che il comportamento effettivo delle strutture in calcestruzzo in presenza di carichi ciclici può essere studiato solo se si conosce il comportamento non lineare del materiale fessurato. Tale comportamento è stato recentemente studiato da Hordijk [2] che, sulla base dei risultati ottenuti da prove a trazione diretta, ha proposto un modello di comportamento per i cicli di carico e scarico che avvengono in fase fessurata. Modelli analoghi erano stati proposti in precedenza da Gylltoft [6] e da Yankelevsky e Reinhardt [7].

Occorre comunque osservare che i pochi codici di calcolo attualmente disponibili per l'analisi statica di strutture in calcestruzzo fessurate nell'ambito della meccanica della frattura non lineare, richiederebbero un impegno computazionale proibitivo per un'analisi ciclica dinamica e quindi risulterebbero difficilmente applicabili nei problemi della pratica progettuale. Sarebbero più facilmente impiegabili modelli semplificati che, se pur approssimati, consentirebbero comunque un sensibile passo avanti nello studio delle strutture in calcestruzzo in presenza di carichi ciclici. Infatti, tali strutture attualmente vengono spesso affrontate con analisi elastiche che non tengono conto dell'evoluzione dei fenomeni fessurativi legati allo stato di sforzo presente all'apice della fessura, studiabili con la meccanica della frattura del calcestruzzo. Nel presente lavoro viene proposto un modello semplificato per la propagazione delle fessure nelle strutture di calcestruzzo sottoposte a carichi ciclici, valido nell'ambito della meccanica della frattura elastica lineare. Tale modello viene confrontato con i risultati di prove sperimentali ottenuti, sia dagli autori che da altri ricercatori, su provini di calcestruzzo sottoposti a carichi ciclici di ampiezza variabile.

2 Applicazioni della meccanica della frattura elastica lineare

I primi tentativi di studio della propagazione per fatica delle fessure nelle strutture di calcestruzzo sono stati fatti impiegando alcune leggi empiriche comunemente usate per i metalli. A causa della presenza della zona di processo all'apice della fessura reale, per poter applicare la meccanica della frattura lineare, nei modelli per il calcestruzzo si fa riferimento alla fessura equivalente, cioè alla fessura che, nel materiale idealizzato a comportamento elastico, dà origine alla stessa deformabilità della struttura reale; la fessura equivalente ha quindi lunghezza intermedia tra la fessura reale e la fessura fittizia (Fig. 1).

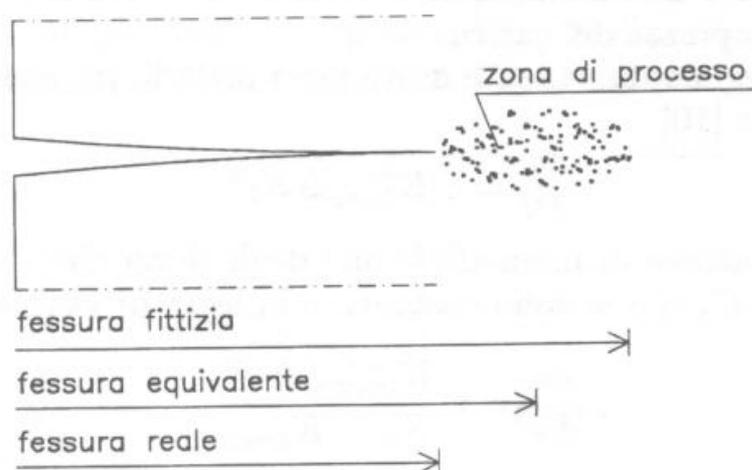


Figura 1: Zona di processo all'apice della fessura e definizione della fessura reale, fittizia ed equivalente

Perdikaris e Calomino [8] hanno cercato di interpretare la propagazione della fessura in provini sottoposti a flessione per mezzo della legge di Paris [9]

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (1)$$

dove a è la lunghezza della fessura equivalente, N il numero di cicli, ΔK la variazione del fattore di intensificazione degli sforzi, C e n sono costanti del materiale. Essi determinarono per il coefficiente n il valore 14 ma sottolinearono la possibilità di sensibili errori nella previsione della resistenza a fatica impiegando tale modello.

Bazant e coautori hanno modificato la legge di Paris per tener conto dell'effetto scala

$$\frac{da}{dN} = C \left(\frac{\Delta K_I}{K_{Ic}} \right)^n \quad (2)$$

dove

$$K_{Ic} = K_{If} \left(\frac{\beta}{1 + \beta} \right)^{\frac{1}{2}}; \beta = \frac{d}{d_0} \quad (3)$$

avendo indicato con K_{If} la tenacità a frattura di una struttura infinitamente grande, d la dimensione caratteristica della struttura e d_0 una costante di natura empirica. Essi mostrarono che sia per un calcestruzzo ordinario [3] che per un calcestruzzo ad alta resistenza [4], C può essere considerata come costante mentre, per un calcestruzzo ordinario, il valore di d_0 per i carichi ciclici è risultato diverso da quello per i carichi monotoni, senza trovare una apparente giustificazione fisica del fenomeno. Occorre osservare che le prove sono state effettuate su campioni sottoposti a carichi ciclici di ampiezza costante e non hanno quindi consentito di studiare l'effetto della variabilità dell'ampiezza del carico.

Tra le altre leggi comunemente usate per i metalli, possono essere citate la legge di Walker [10]

$$\frac{da}{dN} = CK_{I_{max}}^m \Delta K_I^n \quad (4)$$

dove $K_{I_{max}}$ è il fattore di intensificazione degli sforzi che corrisponde allo sforzo massimo e C , n e m sono costanti, o la legge di Forman [11]

$$\frac{da}{dN} = C \frac{K_{I_{max}} \Delta K_I^m}{K_{Ic} - K_{I_{max}}} \quad (5)$$

La prima tiene conto, in aggiunta all'ampiezza dello sforzo, anche dello sforzo massimo, mentre la seconda considera anche il rapido incremento della lunghezza della fessura quando $K_{I_{max}}$ si avvicina al valore della tenacità a frattura del materiale. Nessuna delle leggi considerate tiene però conto della storia e della velocità di carico a cui è sottoposta la struttura che risente prevalentemente della presenza di sovraccarichi che hanno provocato lo sviluppo e la propagazione della zona di processo. Inoltre, i modelli impiegati per i metalli sottoposti a picchi di carico che prevedono un rallentamento della propagazione della fessura a causa della formazione di una zona di materiale plasticizzato attorno al suo apice, non possono essere applicati al calcestruzzo. Infatti, gli eventuali sovraccarichi presenti nella storia di carico del provino di calcestruzzo, provocando una estensione della zona di processo, sono causa di una accelerazione della propagazione della fessura in quanto estendono la zona danneggiabile dai carichi ciclici.

Sulla base delle considerazioni precedenti, un modello approssimato di propagazione della fessura dovrebbe tener conto, oltre che dell'ampiezza dello sforzo, dello sforzo massimo e della tenacità a frattura del materiale, anche della presenza di eventuali picchi verificatisi nella storia di carico del

provino. Tali picchi vengono considerati nel modello qui proposto

$$\frac{da}{dN} = C \frac{K_{I\max}^m \Delta K_I^n}{(K_{Ic} - K_{I\sup})^p} + F(a, \Delta\sigma) \quad (6)$$

attraverso $K_{I\sup}$ che rappresenta il massimo fattore di intensificazione degli sforzi mai raggiunto dalla struttura nella sua storia di carico (Fig. 2); la funzione $F(a, \Delta\sigma)$ rappresenta invece l'improvviso aumento della lunghezza della fessura equivalente causato da un incremento dello sforzo massimo e non è quindi legata a fenomeni di fatica. I valori della funzione $F(a, \Delta\sigma)$ possono essere ottenuti, per un provino con una certa geometria ed una fessura di lunghezza a , applicando diversi incrementi dello sforzo $\Delta\sigma$ e misurando il corrispondente incremento di lunghezza della fessura equivalente a . Per provini di una certa geometria, l'Eq. 6 dipende dalle dimensioni attraverso la tenacità a frattura K_{Ic} [12, 13] e la funzione $F(a, \Delta\sigma)$.

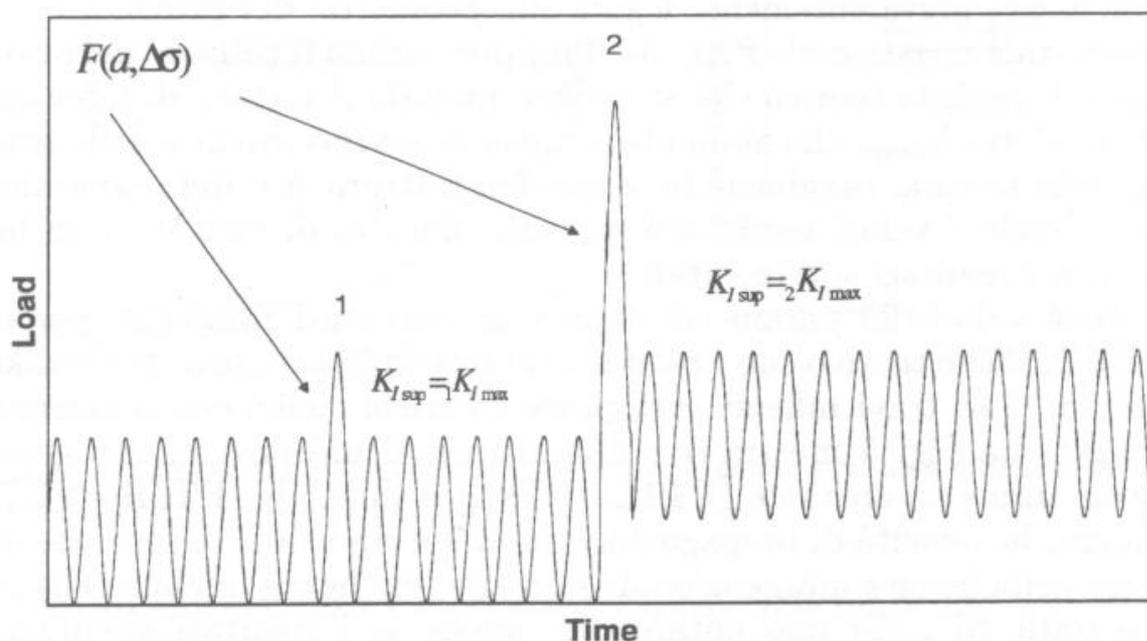


Figura 2: Definizione dei parametri $K_{I,\sup}$ e $F(a, \Delta\sigma)$ che intervengono in una generica storia di carico

3 Confronto del modello teorico con i risultati sperimentali

Il modello teorico viene confrontato con i risultati di prove sperimentali effettuate sia dagli autori [14] che da altri ricercatori [8].

La sperimentazione condotta dagli autori riguarda due serie di provini tipo Compact Tension aventi diversa geometria e diverse dimensioni: 30 x 30 x 10 cm i più piccoli e 60 x 90 x 40 cm i più grandi, sottoposti a diverse storie di carico con frequenza di 3 o 10 Hz [14]. I coefficienti dell'Eq. 6

sono stati determinati attraverso un processo di ottimizzazione sulla base dei risultati ottenuti su entrambi i tipi di provini, mentre i fattori di intensificazione degli sforzi sono stati determinati sulla base della lunghezza della fessura equivalente. Le Figg. 3 e 4 mostrano il confronto tra le curve del modello teorico ed i risultati sperimentali ottenuti dai provini piccoli e grandi rispettivamente. Si può notare come le curve teoriche approssimino bene i risultati sperimentali. Tutte le curve teoriche fanno riferimento allo stesso valore dei parametri m , n , e p pari a 2.0, 1.1 e 0.7 rispettivamente, mentre il coefficiente C è stato assunto pari a $9.5 \cdot 10^{-6}$ per tutti i provini piccoli, e pari a $3.2 \cdot 10^{-5}$ per tutti i provini grandi, avendo espresso il fattore di intensificazione degli sforzi in $MNm^{-3/2}$ e la lunghezza della fessura in metri. La tenacità a frattura K_{Ic} è stata misurata sperimentalmente ed è risultata pari a $0.95MNm^{-3/2}$ per i provini piccoli e $1.48MNm^{-3/2}$ per i provini grandi. Poichè l'effetto scala è stato messo in conto, almeno parzialmente, attraverso la tenacità a frattura K_{Ic} , la variabilità del parametro C potrebbe essere prevalentemente legata alla geometria del provino.

Le linee tratteggiate delle Figg. 3 e 4 rappresentano il collasso del provino previsto dal modello teorico che si verifica quando il fattore di intensificazione degli sforzi K_{Isup} , che aumenta a causa di sovraccarichi o della propagazione della fessura, raggiunge la tenacità a frattura K_{Ic} del materiale. Si noti come anche i valori teorici del massimo numero di cicli siano in buon accordo con i risultati sperimentali.

Gli stessi valori dei parametri m , n e p sono stati impiegati per confrontare il modello teorico con i risultati sperimentali ottenuti da Perdikaris e Calomino [8] su travi inflesse sottoposte a carichi ciclici con frequenza di $0.5 \div 1.0$ Hz. La Fig. 5 mostra il confronto per alcuni provini sottoposti a carico con ampiezza costante (FT4L e FT9L) e variabile (FT6H e FT7H). Nella figura, la velocità di propagazione da/dN è riportata in funzione della lunghezza della fessura adimensionalizzata alla lunghezza iniziale della zona non fessurata "d". Si può notare che, anche se i risultati sperimentali mostrano una notevole dispersione, il modello teorico coglie l'andamento generale della prova, sia per carichi di ampiezza costante che per carichi di ampiezza variabile. In questo caso, il valore di C che ha consentito la miglior approssimazione dei risultati sperimentali è risultato di $2.5 \cdot 10^{-5}$.

4 Conclusioni

Il comportamento a fatica delle strutture fessurate di calcestruzzo può essere correttamente interpretato per mezzo di un approccio basato sulla meccanica della frattura non lineare. Poichè il danneggiamento avviene quasi totalmente nella zona di processo, risulta evidente che la risposta di una

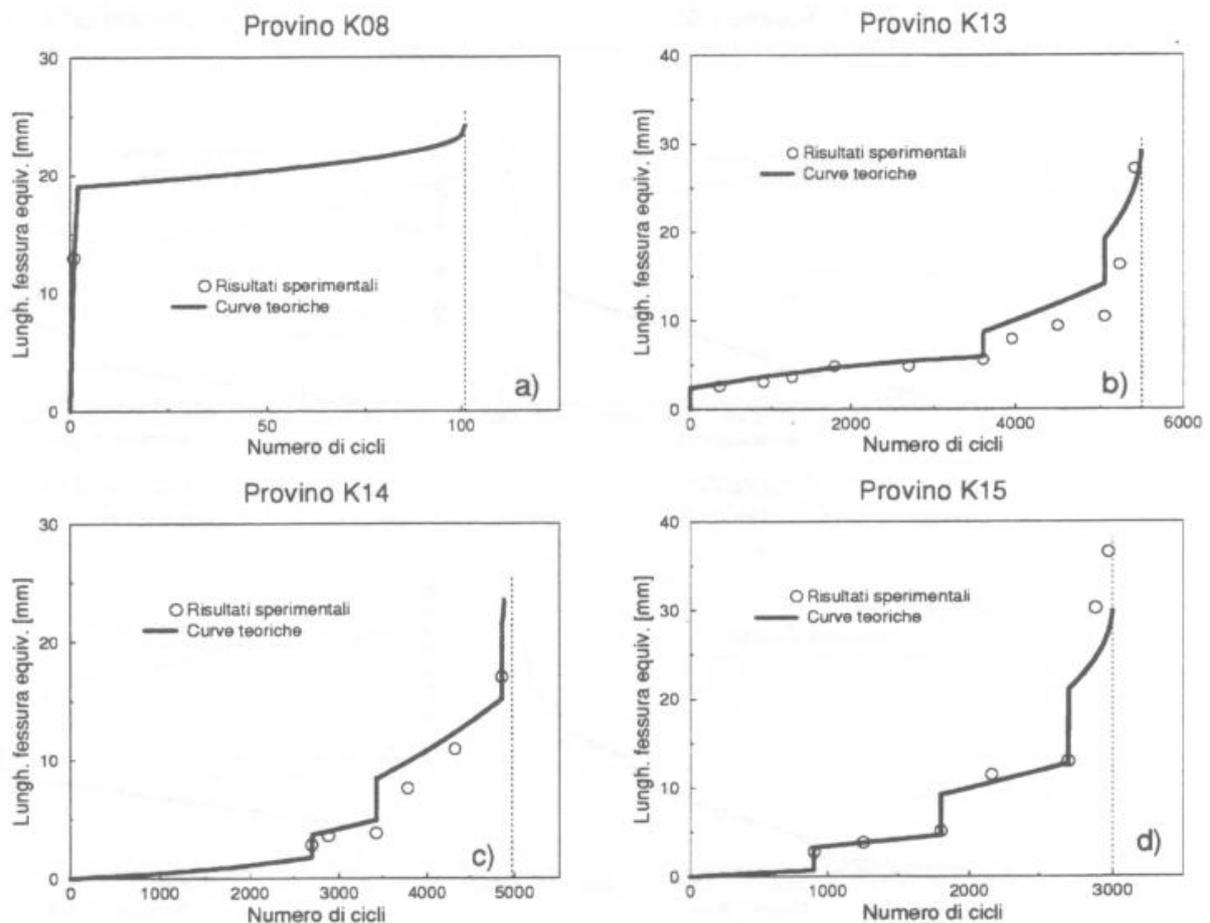


Figura 3: Confronto tra la lunghezza della fessura elastica equivalente del modello teorico ed i risultati delle prove sperimentali [14] su provini piccoli

stuttura di calcestruzzo sottoposta a carichi ciclici dipende non solo dalle dimensioni della struttura e dalle proprietà di frattura del materiale, ma anche dalla storia di carico a cui è il provino è sottoposto. Infatti, la presenza di un picco nella storia di carico del provino provoca l'estensione della zona di processo e quindi una maggior lunghezza della zona nella quale si accumula il danno per effetto dei carichi ciclici. Questo comportamento differenzia le strutture di calcestruzzo dalle strutture metalliche, nelle quali i sovraccarichi provocano la formazione di una zona plastica all'apice della fessura che causa un rallentamento della sua propagazione.

Nel presente lavoro è stato proposto un modello semplificato di propagazione della fessura, che fornisce una soluzione approssimata operando nell'ambito della meccanica della frattura elastica lineare. Tale modello tiene conto della storia di carico, in particolare per quanto riguarda una

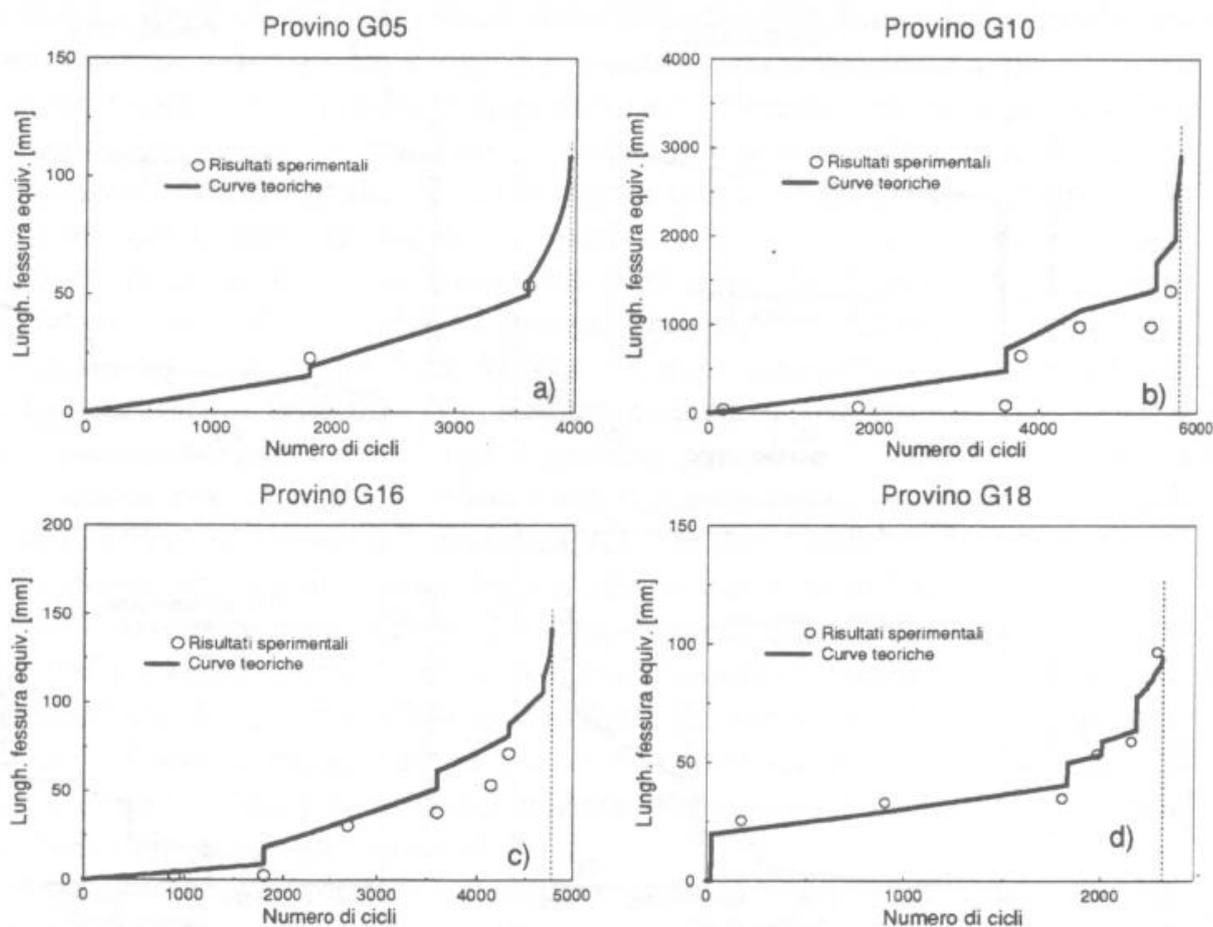


Figura 4: Confronto tra la lunghezza della fessura elastica equivalente del modello teorico ed i risultati delle prove sperimentali [14] su provini grandi

eventuale presenza di precedenti sovraccarichi. Le curve teoriche sono risultate in buon accordo con i risultati di prove sperimentali, effettuate sia dagli autori che da altri ricercatori. Il limitato numero di risultati sperimentali non ha consentito di verificare l'influenza della frequenza di carico sul valore dei parametri del modello teorico.

Ringraziamenti

La ricerca è stata finanziata dall'Electric Power Research Institute, Palo-Alto (CA), con contratto No. RP2917-08. Gli autori desiderano ringraziare il direttore del progetto di ricerca, Sig. Doug Morris, e il Sig. Howard Boggs per i numerosi suggerimenti e per il continuo interessamento mostrato durante lo svolgimento della ricerca.

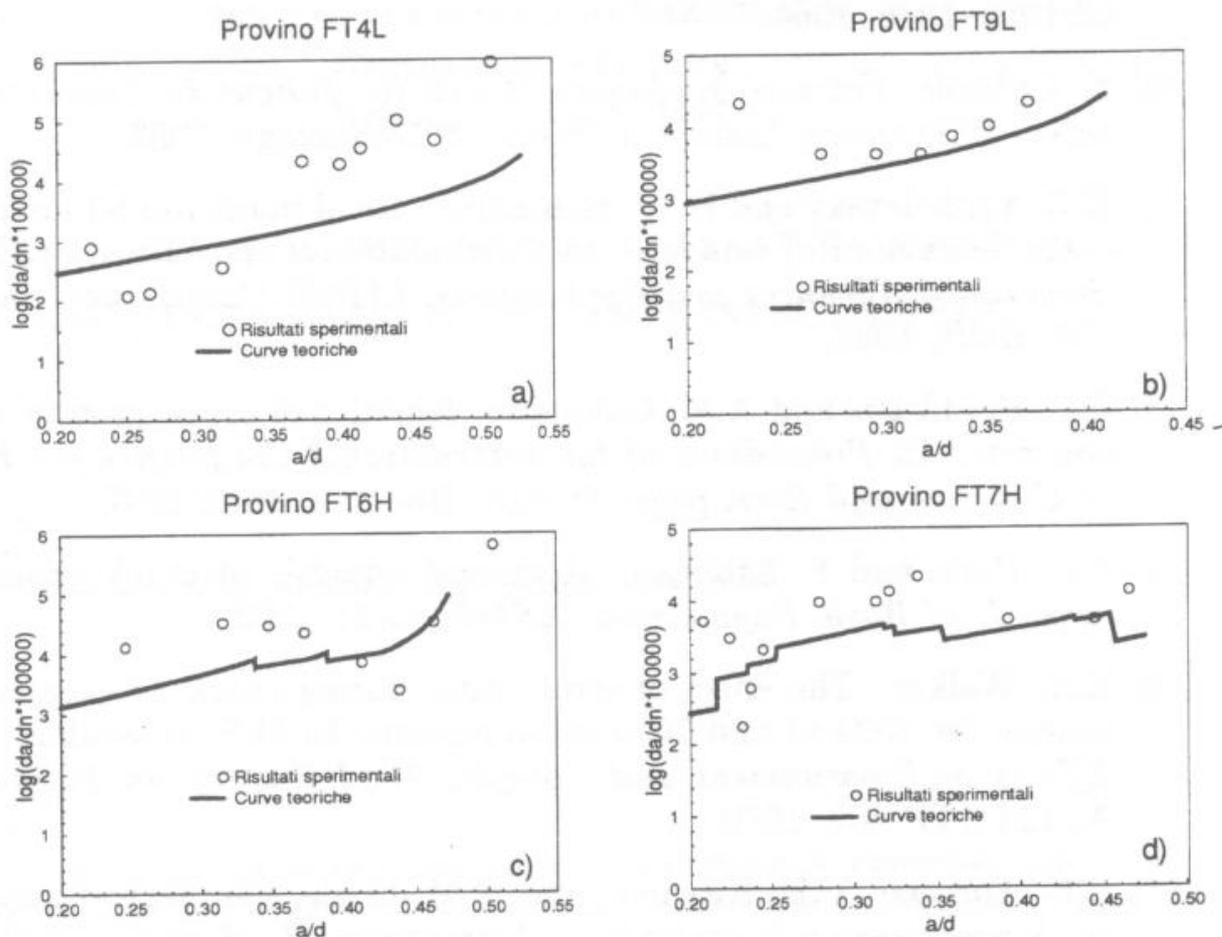


Figura 5: Confronto tra la lunghezza della fessura elastica equivalente del modello teorico ed i risultati delle prove sperimentali [8] su travi inflesse

Bibliografia

- [1] Comité Euro-International du Béton. *Fatigue of Concrete Structures: State of the Art Report, Bulletin No.188*. Comite Euro-international du Béton.
- [2] D.A. Hordijk. *Local approach to Fatigue of Concrete*. PhD thesis, Delft University of Technology, 1991.
- [3] Z.P. Bažant and K. Xu. Size effect in fatigue fracture of concrete. *ACI Materials Journal*, 88(4):390–399, 1991.
- [4] Z.P. Bažant and W.F. Shell. Fatigue fracture of high-strength concrete and size effect. *ACI Materials Journal*, 90(5):472–478, 1993.

- [5] H.K. Hilsdorf and C.E. Kesler. Fatigue strength of concrete under varying flexural stresses. *Journal of the American Concrete Institute*, 63:1059–1076, 1964.
- [6] K. Gylltoft. *Fracture Mechanics Models for Fatigue in Concrete Structures*. PhD thesis, Lulea University of Technology, 1983.
- [7] D.Z. Yankelevsky and H.W. Reinhardt. Focal point model for uniaxial cyclic behaviour of concrete. In *Computational Mechanics of Concrete Structures; Advances and Applications, IABSE Colloquium*, pages 99–106, Delft, 1987.
- [8] P.C. Perdikaris and A.M. Calomino. Kinetics of crack growth in plain concrete. In *Proceedings of the International Conference on Fracture of Concrete and Rock*, pages 96–101, Houston, June 1987.
- [9] P.C. Paris and F. Erdogan. A critical analysis of crack propagation laws. *J. of Basic Engineering, ASME*, 85(3), 1963.
- [10] E.K. Walker. The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-t3 and 7075-t6 aluminum. In M.S. Rosenfeld, editor, *Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life*. ASTM STP 462, 1970.
- [11] R.G. Forman, V.E. Kearney, and R.M. Engle. Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structures. *J. of Basic Engineering*, 89:459–464, 1967.
- [12] A. Carpinteri. Notch sensitivity in fracture testing of aggregative materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 16:467–481, 1982.
- [13] Bažant, Z.P. Size effect in blunt fracture: Concrete, rock, metal. *J. of Engineering Mechanics, ASCE*, 110(4):518–535, 1984.
- [14] V. Slowik and V.E. Saouma. Effect of hydrodynamic pressure and tensile excursion on cracking of concrete. Technical report, Electric Power Research Institute, Palo-Alto, CA, 1994. Final Research Report Submitted by the University of Colorado.