

**DANNEGGIAMENTO PER FATICA DI CALCESTRUZZI NORMALI E
FIBRORINFORZATI: MISURE CON ULTRASUONI E CONSIDERAZIONI SULLE
LEGGI DI PROPAGAZIONE DELLA FRATTURA**

E. CARTAPATI

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica
Università di Roma "La Sapienza"

SOMMARIO

Vengono presentati nel presente lavoro i risultati di prove di fatica per flessione su provini di calcestruzzo ordinario e rinforzato con fibre di acciaio. I provini sono stati sottoposti ad un controllo continuo per mezzo di ultrasuoni studiando la variazione dell'attenuazione del segnale durante la prova. I risultati ottenuti, riportati secondo un indice di danneggiamento opportunamente assunto, sono stati sottoposti ad un esame critico in rapporto alla scelta dell'indice stesso ed in confronto con i parametri classici della meccanica della frattura per fatica.

INTRODUZIONE

L'evoluzione del danneggiamento per fatica nel calcestruzzo ordinario è stato ampiamente studiato nell'ultimo decennio allo scopo di dedurre leggi empiriche utili alla previsione della vita residua di elementi strutturali in calcestruzzo soggetti a cicli di carico ripetuti. L'introduzione dei calcestruzzi fibrorinforzati richiede nuove ricerche destinate a caratterizzare le prestazioni di tali nuovi compositi in confronto con quelle del calcestruzzo ordinario di pari composizione. Presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell'Università di Roma "La Sapienza" è stato da tempo iniziato un programma di ricerca sui calcestruzzi rinforzati con fibre di acciaio e di polipropilene (1-2), in collaborazione con il Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade della stessa Università. I sottoprogrammi riguardanti la fatica e l'urto sono attualmente in corso. Dei provini prismatici di calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio sono stati sottoposti a prove di flessione con carichi ciclici di ampiezza costante, variando il valore del carico massimo a

diversi livelli rispetto al carico ultimo della prova monotona. Durante le prove è stato eseguito un monitoraggio continuo del comportamento del calcestruzzo con misure della velocità di propagazione e dell'attenuazione di intensità di onde ultrasonore. Questo secondo parametro è apparso più significativo per la valutazione del danneggiamento progressivo per fatica del calcestruzzo. La correlazione dei risultati sperimentali, espressi in funzione di tale attenuazione, con le espressioni ed i parametri proposti dalla meccanica della frattura costituisce lo scopo principale del presente lavoro.

PROGRAMMA DELLE PROVE SPERIMENTALI E RISULTATI

Il programma generale della ricerca ed il sottoprogramma relativo alla fatica sono stati presentati in (1) e (3). Si riportano qui le informazioni essenziali relative ai campioni utilizzati ed alle prove eseguite.

Materiali e provini

Sono state utilizzate tre diverse composizioni del calcestruzzo: una miscela base di riferimento, di classe Rck 35 N/mm², e due altre ottenute con l'aggiunta di fibre di acciaio con i dosaggi qui di seguito indicati:

- A) Calcestruzzo ordinario;
- B) Calcestruzzo rinforzato con 75 kg/m³ di fibre di acciaio (0.95 % in volume);
- C) Calcestruzzo rinforzato con 150 kg/m³ di fibre di acciaio (1.91 % in volume).

I provini sono stati gettati nelle cassaforme standard per la confezione dei cubetti di prova eliminando i diaframmi intermedi ed ottenendo così provini prismatici delle dimensioni di 160x160x650 mm.

Prove eseguite

Sono state eseguite prove di flessione su quattro punti sia statiche che cicliche: dalle prove statiche sono state ottenute le curve freccia-carico ed il valore del carico ultimo di riferimento per le prove di fatica; le prove con carichi ciclici di diverso livello massimo e di ampiezza costante sono state eseguite per la determinazione del numero di cicli a rottura. I carichi massimi e minimi considerati sono i seguenti:

$P_{\max} = 70 \%, 77.5 \% \text{ e } 85 \% \text{ del carico ultimo statico};$

$P_{\min} = 0.20 P_{\max}$

Il monitoraggio con ultrasuoni è stato eseguito su una parte

dei provini sia durante le prove statiche che durante le prove di fatica. Sono state misurate le velocità di propagazione e l'attenuazione di ampiezza degli ultrasuoni sulla lunghezza maggiore del provino. Lo schema delle prove e le attrezzature utilizzate sono state descritte in (4).

Risultati

Assumendo come parametro significativo per la valutazione del danneggiamento progressivo del calcestruzzo l'indice proposto da Suaris e Fernando in (5):

$$D = 1 - \frac{A}{A_0} \quad (1)$$

in cui A_0 è l'ampiezza di riferimento dell'onda ultrasonora misurata nel provino prima che venga sottoposto ad alcun carico ed A è l'ampiezza variabile del segnale durante la prova, i risultati delle prove sono riportati nelle figure 1 e 2. L'indice di danneggiamento è stato assunto crescente verso l'alto, contrariamente a (5). In figura 1 sono riportate le curve ottenute da tre provini appartenenti alle tre miscele sottoposti alla prova statica fino a rottura. Nella figura 2 sono riportati i diagrammi ottenuti da prove di fatica su cinque provini per ciascuna miscela e ciascun livello di carico.

LA PROPAGAZIONE DEL DANNEGGIAMENTO PER FATICA SECONDO LE TEORIE DELLA MECCANICA DELLA FRATTURA

Nell'ambito delle teorie della meccanica della frattura, il danneggiamento progressivo per fatica viene espresso per mezzo della legge di propagazione della frattura, generalmente scritta nella forma:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta\sigma, a, C_i) \quad (2)$$

in cui a è la semiampiezza della fessura, $\Delta\sigma$ l'ampiezza del ciclo della tensione perpendicolare alla fessura e C_i un insieme di costanti caratteristiche del materiale. La funzione f è stata anche proposta nella forma:

$$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta\sigma^n a^m}{C_0} \quad (3)$$

e ponendo $m = n/2$, come suggerito da Paris in (6) nel 1957 introducendo lo "stress intensity factor" K_I :

$$\frac{da}{dN} = G\{K\} = G\{C_1 \Delta\sigma \sqrt{\pi a}\} = C_2 (\Delta\sigma \sqrt{\pi a})^n \quad (4)$$

Pertanto la formulazione di Paris non modifica la forma dell'equazione (3), ma la specializza secondo la Meccanica della frattura elastica lineare. Per questa ragione si può ritenere che l'equazione (3) sia applicabile per un insieme di materiali più ampio rispetto all'equazione (4).

Hillerborg (7) ha introdotto una lunghezza caratteristica per il calcestruzzo:

$$l_c = \frac{G_f E}{f^2}$$

che limita la validità della meccanica della frattura e.l. a travi di calcestruzzo ordinario di altezza superiore a 20 volte l_c . Essendo $l_c = 25-40$ cm, la meccanica della frattura e.l. non può essere impiegata per le travi correnti in c.a. (Carpinteri (8)), per quanto possa essere ancora accettabile per elementi in calcestruzzo di notevoli dimensioni come, ad esempio, i tetrapodi, dolos, etc. di barriere frangiflutti.

La legge di Paris non potrebbe strettamente essere usata in questo caso, ma, in accordo alle precedenti considerazioni sull'equazione (3) e non essendo disponibili attualmente teorie sintetiche per l'analisi della fatica nell'ambito della meccanica della frattura non lineare, appare giustificabile poter integrare la legge di propagazione della frattura per ottenere la curva S-N della durata della vita a fatica, allo scopo di dare una valutazione qualitativa del comportamento a fatica del calcestruzzo (sia normale che fibrorinforzato). Integrando l'equazione (4) con la condizione al contorno che l'ampiezza della fessura tende all'infinito per un numero di cicli pari a quello di rottura $N = N_C$ (ipotesi di un'unica fessura che si estende fino alla rottura), si ottiene:

$$\left(\frac{a}{a_0}\right)^{n/2-1} = \frac{1}{1 - N/N_C} \quad (5)$$

ed integrando da $N = 0$ a $N = N_C$, si ottiene la relazione tra l'ampiezza del ciclo di tensione e la corrispondente durata della vita a fatica (CEB (9)):

$$\Delta\sigma^n N_C = \frac{1}{a_0^{n/2-1} (n/2-1) C Y^n \pi^{n/2}} \quad (6)$$

Per quanto le equazioni (5) e (6) non siano strettamente valide per il calcestruzzo, come già detto, appare tuttavia significativo poterle usare per un confronto qualitativo con i risultati sperimentali.

L'ATTENUAZIONE DI AMPIEZZA DELLE ONDE ULTRASONICHE E LA MICROFESSURAZIONE DEL CALCESTRUZZO

L'attenuazione di ampiezza delle onde ultrasoniche è principalmente dovuta alla presenza di difetti della matrice incontrati lungo il percorso di propagazione dell'onda attraverso il campione di calcestruzzo dalla sonda emittente a quella ricevente. Appare ragionevole ipotizzare che l'energia elastica dell'onda sia dissipata prevalentemente in corrispondenza delle microfessure giacenti su piani perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda stessa; tali fessure, data la disposizione di prova, sono anche perpendicolari alle tensioni di trazione fornite dalla flessione: si tratta pertanto di quelle considerate ai fini della legge di propagazione della frattura.

Si cerca ora di confrontare i risultati sperimentali con la relazione (3), attraverso la considerazione dell'incremento di energia dissipata all'interno del provino al procedere del danneggiamento per fatica. Tale incremento viene espresso in funzione delle ampiezze A dei segnali ultrasonici misurati sperimentalmente durante la prova, ed in funzione delle lunghezze a , caratterizzanti l'estensione delle singole microfessure. Nel primo caso l'energia del segnale che attraversa il provino e viene captato dalla sonda ricevente è proporzionale al quadrato dell'ampiezza d'onda; pertanto l'incremento di energia dissipata rispetto alla condizione iniziale è data da:

$$\Delta W = K A_0^2 - K A^2 \quad (7')$$

essendo K una costante. Nel secondo caso, assumendo che l'energia dissipata sia proporzionale alla superficie totale delle microfessure, supposte circolari, perpendicolari alla traiettoria dell'onda ultrasonica, risulta:

$$\Delta W = H[\pi(a_F^2 - a_0^2)] - H[\pi(a_F^2 - a^2)] \quad (7'')$$

con H costante ed avendo voluto esprimere, in stretta analogia alla (7'), il ΔW come differenza delle energie attraversanti il provino all'inizio della prova e dopo N cicli (il termine $[(a_F^2 - a^2)\pi]$ rappresenta l'area efficiente ai fini della trasmissione dell'onda). La lunghezza a_F introdotta rappresenta l'ampiezza media caratterizzante le fessure che confluiscono a formare la frattura globale al momento della rottura del provino. L'espressione (7''), perfettamente identica alla

$$\Delta W = H\pi(a^2 - a_0^2)$$

(che parrebbe più ovvia), oltre che corrispondere meglio, come già detto, alla (7'), permette attraverso il parametro a_F un esame critico più dettagliato dei risultati ottenuti.

Adimensionalizzando le due espressioni (7') e (7'') ed

eliminando così le costanti K ed H, si ottengono le due funzioni:

$$F_1 = \frac{\Delta W}{KA_0^2} = 1 - \left(\frac{A}{A_0}\right)^2 \quad (8')$$

$$F_2 = \frac{\Delta W}{H[\pi(a_F^2 - a_0^2)]} = 1 - \frac{a_F^2 - a^2}{a_F^2 - a_0^2} \quad (8'')$$

L'espressione (8'') può essere ulteriormente trasformata utilizzando la (5). Si ottiene:

$$F_2 = \frac{1}{C} \left[\left(1 - \frac{N}{N_C}\right)^{-4/(n-2)} - 1 \right] \quad (9'')$$

in cui:

$$C = \left(1 - \frac{N_F}{N_C}\right)^{-4/(n-2)} - 1$$

Le funzioni F_1 (8') ed F_2 (9'') assumono valori compresi tra 0 (provino non ancora sottoposto a carichi) ed 1 (rottura). Esse possono quindi essere utilizzate al posto della (1) come indici del danneggiamento progressivo per fatica del calcestruzzo.

Mentre la F_1 viene determinata in funzione delle misure sperimentali, la funzione F_2 richiede qualche ulteriore studio allo scopo di poter effettuare un confronto parametrico con i risultati ottenuti. Le sue derivate prime agli estremi del campo di definizione sono:

$$\text{per } N = 0 : \quad F_2'(0) = \frac{4}{n-2} \frac{1}{C N_C} = 0$$

$$\text{per } N = N_F : \quad F_2'(N_F) = \frac{4}{n-2} \frac{1}{N_C - N_F}$$

Nella figura 3, oltre ai risultati sperimentali, sono stati disegnati gli andamenti qualitativi della funzione F_2 (9'') per i valori di $n = 3$ ed $n = 4$, in accordo alle seguenti ipotesi:

- curve A: la legge di propagazione della frattura viene considerata valida dall'inizio della prova di fatica (provino non ancora sottoposto ad alcun carico);

- curve B e C: la legge di propagazione della frattura viene applicata pensando di aver già sottoposto il provino ad un carico statico pari al valore medio del carico ciclico. Le curve sono state ottenute modificando l'equazione (7'') con

l'introduzione di un nuovo valore incrementato di a_0 . Inoltre le curve B si distinguono dalle curve C in rapporto alle condizioni di rottura: le prime corrispondono ad una rottura causata da poche fessure molto estese ($N_F = N_C$); le seconde corrispondono ad una rottura causata dal contemporaneo sviluppo di un gran numero di microfessure ($N_F < N_C$).

OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

Dall'esame dei risultati sperimentali (figg. 1 e 2), dal confronto con le curve A, B e C in figura 3 e nell'ambito delle ipotesi sottolineate precedentemente sui limiti di validità delle teorie della meccanica della frattura lineare applicate al calcestruzzo, è possibile osservare quanto segue:

- le misure di attenuazione delle onde ultrasoniche mostrano come, all'inizio della prova di fatica, il livello di danneggiamento del campione raggiunge rapidamente il valore corrispondente all'incirca a quello della prova statica con carico pari a quello medio della prova di fatica (fig. 1 e 2);
- le curve A della figura 3, in disaccordo con i dati sperimentali, suggeriscono che la legge di propagazione della fessura non è capace di descrivere l'evoluzione del danneggiamento fin dall'inizio (provino scarico) della prova di fatica;
- le curve B e C sembrano corrispondere meglio alle rilevazioni sperimentali, ma richiedono, come condizioni iniziali, la conoscenza del livello di danneggiamento dovuto al carico medio in condizioni statiche;
- per quanto riguarda l'effetto dell'aggiunta di fibre di acciaio sul comportamento a fatica del calcestruzzo, le curve relative al calcestruzzo fibrorinforzato rimangono al di sotto rispetto a quelle del calcestruzzo ordinario; secondo quanto osservato al paragrafo precedente sulle caratteristiche delle curve B e C, ciò dovrebbe corrispondere ad una minore lunghezza iniziale delle fessure rispetto al calcestruzzo ordinario.

Quanto ora messo in evidenza può essere considerato come indicazione utile ad indirizzare un ulteriore sviluppo delle ricerche verso particolari aspetti della meccanica della frattura del calcestruzzo, con l'impiego di tecniche più sofisticate, capaci di indagare più da vicino il comportamento del materiale nei confronti della microfessurazione.

RINGRAZIAMENTI

L'autore esprime la sua gratitudine alla Ditta Girola per aver fornito i provini utilizzati nelle prove ed al personale del

Laboratorio Prove Materiali e Strutture del Dipartimento per il considerevole impegno ed aiuto prestato durante lo svolgimento delle prove sperimentali.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Calamani, S., Franco, L., Noli, A., Radogna, E.F.: "Conglomerati cementizi fibrorinforzati: Stato dell'arte ed indagini preliminari per una ricerca sulla possibilità di impiego per opere marittime", Studi e Ricerche, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell'Università di Roma "La Sapienza", Marzo 1987, N.1/87.
- (2) Calamani, S., Cartapati, E., Radogna, E.F.: "Influenza dell'aggiunta di fibre di polipropilene nel conglomerato cementizio per l'impiego in elementi prefabbricati", Giornate AICAP'89, Napoli, 4-6 maggio 1989.
- (3) Cartapati E., DeGirolamo P., Noli A., Radogna E. F.: "Primi risultati di una indagine sulla fatica dei conglomerati cementizi fibro-rinforzati con particolare riguardo al loro impiego nelle opere marittime", Seminario AICAP "Calcestruzzi speciali", L'Aquila, 5-6 ottobre 1988.
- (4) Cartapati E.: "Valutazione per mezzo di ultrasuoni del livello di danneggiamento per fatica di calcestruzzi ordinari e fibrorinforzati", International Conference on Monitoring, Surveillance and Predictive Maintenance of Plants and Structures, Taormina, 16-18 ottobre 1989, datt. in pr., Roma, dicembre 1990.
- (5) Suaris W., Fernando V.: "Using ultrasonic attenuation for assessing the fatigue damage of concrete", Transactions of the 9th international conference on structural mechanics in reactor technology, Lausanne, 17-21 August 1987, Vol.H, pp. 573-578.
- (6) Paris P., Erdogan F.: "A critical analysis of crack propagation laws", Journal of Basic Engineering, ASME, December 1963, pp.528-534
- (7) Hillerborg, A., Modeer, M., Petersson, P.E.: "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements", Cement and concrete research, Vol.6, 1976, pp.773-782.
- (8) Carpinteri, A.: "Application of fracture mechanics to concrete structures", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.108, N.ST4, April 1982, pp.833-848.
- (9) CEB: "Fatigue of concrete structures", Bulletin d'information N,188, Juin 1988.

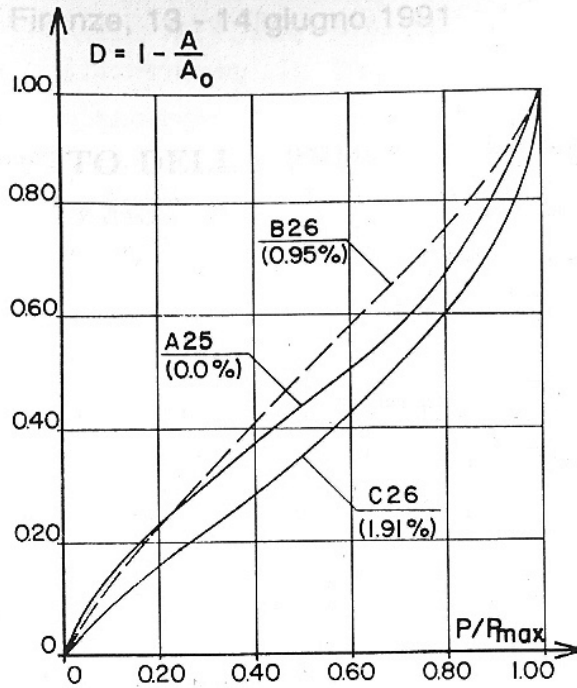


Figura 1 - Andamento del danneggiamento nelle prove statiche.

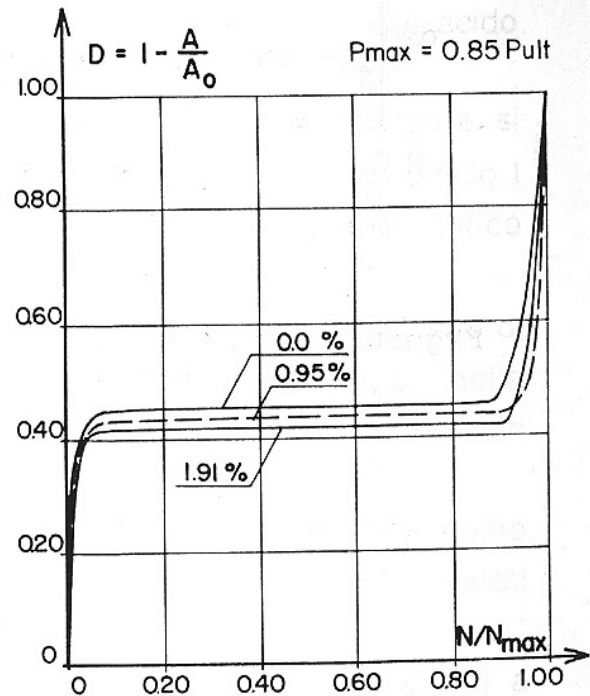
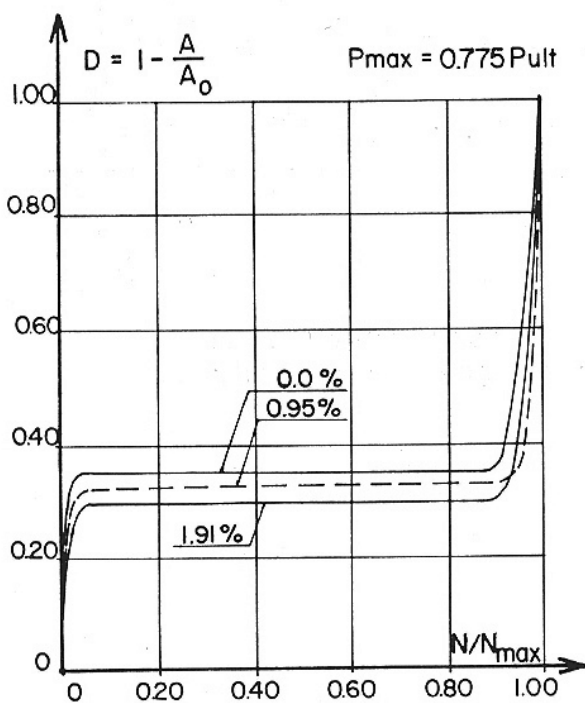


Figura 2 - Andamento del danneggiamento durante le prove cicliche a fatica.

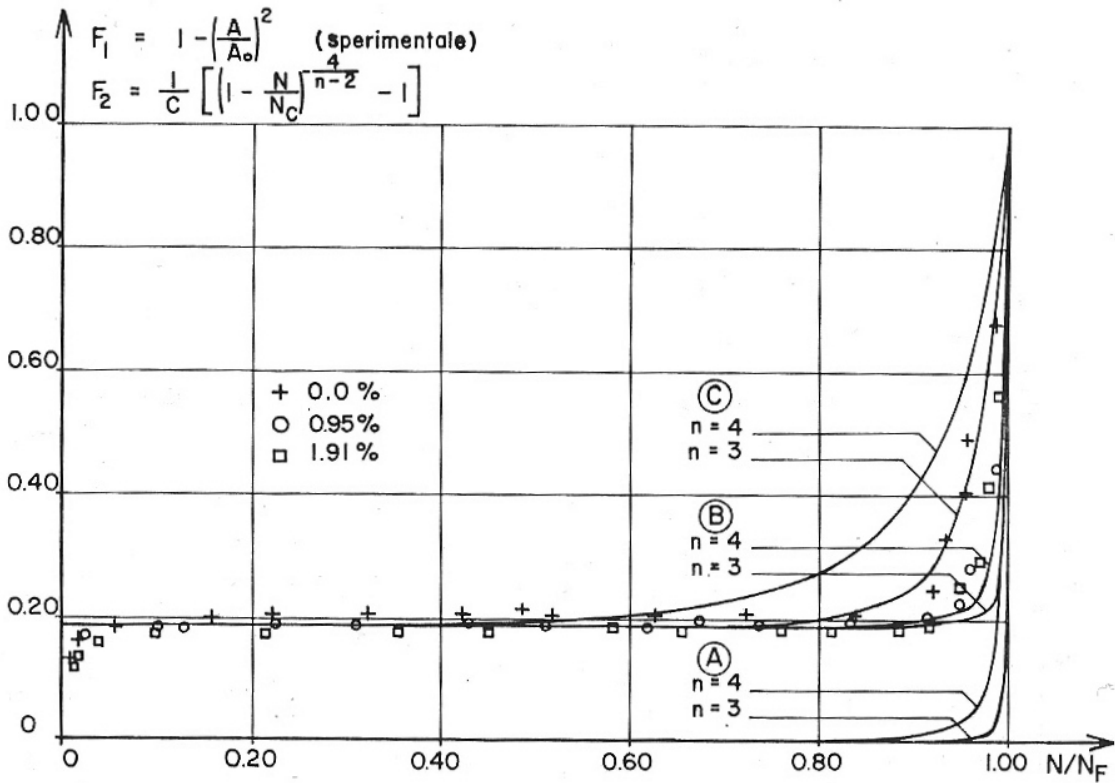


Figura 3 - Confronto fra i risultati sperimentali e le curve di danneggiamento progressivo proposte.