

IGF6 - VI Convegno Nazionale

GRUPPO ITALIANO FRATTURA

Ancona, 7 - 8 giugno 1990

S. Mataloni, R. Merloni, A. Terranova

Dipartimento di Meccanica Università degli Studi di Ancona

Via delle Breccie Bianche, 60131 Ancona

ANALISI NUMERICA E SPERIMENTALE DELLA NUCLEAZIONE E DELLA
PROPAGAZIONE DI FRATTURE IN SUPPORTI A STAFFA

SOMMARIO

Il lavoro vuole mettere in evidenza la metodologia da seguire per lo studio di componenti meccanici reali operanti sotto carichi ciclici sufficientemente elevati. Durante l'esercizio un componente meccanico può subire sollecitazioni localizzate così elevate, e comunque superiori al limite di resistenza, tali da far nucleare una frattura che si propaga fino ad interrompere la funzionalità dell'elemento. A livello empirico e fenomenologico la modalità di accrescimento progressivo delle cricche è strettamente controllata dall'intensità del campo di tensioni esistente all'estremità delle stesse ed esprimibile mediante un unico parametro. A tal fine è stato messo a punto un modello numerico che permettesse di valutare lo stato tensionale dell'elemento in presenza di una discontinuità e di caratterizzare la frattura schematizzata. La validità del modello numerico è stata confermata dai risultati dell'analisi sperimentale effettuata tramite trasduttori elettrici a resistenza posizionati nelle zone più significative.

1 - INTRODUZIONE

Negli organi di macchine sottoposti ad una sollecitazione ripetuta nel tempo, e sufficientemente elevata, la nucleazione della frattura può essere prevista attraverso la conoscenza dello stato locale di sollecitazione e dei parametri del materiale relativi alla fatica [1]. Anche la previsione della fase successiva di propagazione della frattura richiede la conoscenza dei parametri caratteristici della Meccanica della Frattura, per il materiale in esame, e la determinazione dello stato tensionale in presenza di tale discontinuità [2]. In questo modo si riesce a precisare con approssimazione sufficiente la vita residua dell'elemento meccanico. Per entrambe le fasi, se si vuole una determinazione accurata, è necessario sviluppare un modello che precisi lo stato tensionale nell'elemento con intaglio per la prima fase e con la frattura per la seconda fase [3]. In questo studio, inserito in un programma di ricerca sull'affidabilità di componenti meccanici di serie, è compresa l'analisi della nucleazione e successiva propagazione di fratture in elementi di supporto di cilindri oleoidraulici.

Dopo una fase di dimensionamento a termine dell'elemento effettuata con i dati relativi alla resistenza a fatica oligociclica reperibili in bibliografia si è messo a punto un modello agli elementi finiti con intaglio dell'organo per definirne lo stato tensionale. Parallelamente all'analisi numerica è stata condotta la parte sperimentale che ha fornito, tramite i rilievi effettuati con trasduttori elettrici a resistenza, indicazioni sul comportamento nelle condizioni effettive di lavoro.

Il processo di fratturazione ha avuto inizio entro il periodo previsto e successivamente per caratterizzare la frattura, calcolando il valore del J-Integral, è stato perfezionato il modello agli elementi finiti con l'inserimento della discontinuità in modo da raccordare perfettamente il contorno delle superfici di frattura con gli elementi contigui [4].

2 - DIMENSIONAMENTO A FATICA OLIGOCICLICA

Come è noto la vita totale di un elemento che opera sotto carichi alternati sufficientemente elevati può essere suddivisa in una prima fase di nucleazione della frattura che può estendersi per gran parte della durata ed in una seconda fase di propagazione della cricca.

Nel caso del componente in esame, che fa parte della struttura di supporto di cilindri idraulici, nota la forma imposta dalle condizioni di esercizio, fig.1, si è proceduto alla scelta della dimensione "b" con l'obiettivo di far nucleare una frattura per un numero di cicli di fatica prossimo a 50000.

Per determinare il valore della deformazione ciclica si sono utilizzati i risultati riportati in bibliografia [1] per un materiale comparabile al Fe 410 D UNI 7070-82 con il quale sono realizzati i componenti.

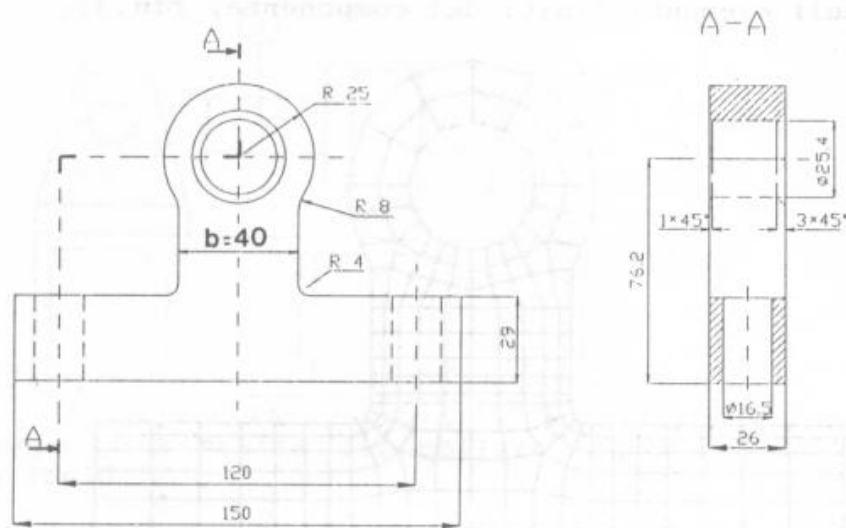


Fig.1 - Staffa di supporto di cilindri oleoidraulici.

La composizione chimica e le caratteristiche meccaniche di questo materiale sono riportate nella tab.I.

Tab.I - Composizione chimica e caratteristiche meccaniche del materiale.

Composizione chimica

C = 0.25%
 P < 0.08%
 S < 0.05%

Caratteristiche meccaniche

E = 207000 [N/mm²]
 R_{p0.2} = 255 [N/mm²]
 R_m = 437 [N/mm²]
 A₅ = 32
 Z = 60

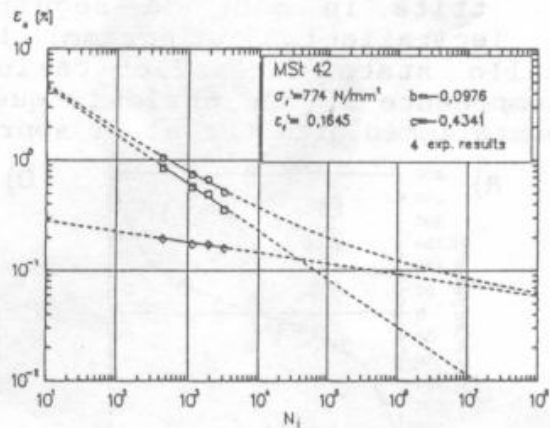


Fig.2 - Dati di resistenza a fatica.

Dal diagramma riportato in fig.2 si rileva che per N=50000 cicli l'ampiezza della deformazione alternata totale deve essere pari a $\epsilon_a = 2100 \mu\text{m/m}$. Tale valore in questo caso ha carattere indicativo in quanto i punti di applicazione dei carichi all'elemento meccanico e quelli delle reazioni vincolari differiscono da quelli ipotizzati sia per effetto delle tolleranze geometriche ammesse sia per la deformazione che ne modifica la posizione. Inoltre la distribuzione delle

tensioni nella sezione più sollecitata è ben lontana da quella uniforme prevista nella determinazione dei dati di resistenza a fatica e quindi per stabilire l'escursione della deformazione nei punti in cui presumibilmente si verificherà la nucleazione della frattura si è costruito un modello agli elementi finiti del componente, fig.3.

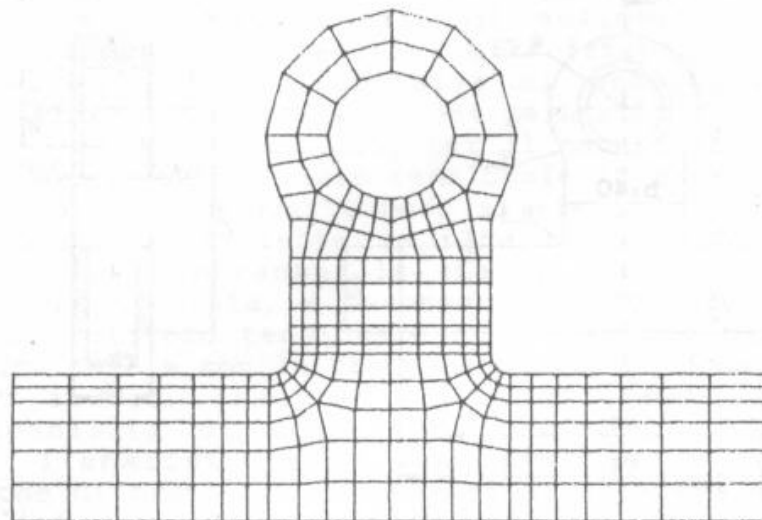


Fig.3 - Modello agli elementi finiti del componente.

La schematizzazione è stata effettuata con elementi isoparametrici a otto nodi con otto punti di integrazione e nella zona di raccordo la "mesh" è stata opportunamente infittita in modo da seguire meglio l'andamento delle sollecitazioni. I diagrammi di fig.4 mostrano l'andamento dello stato di sollecitazione lungo il lato "b" del componente in due sezioni; quella più sollecitata e quella posta immediatamente al di sopra di essa.

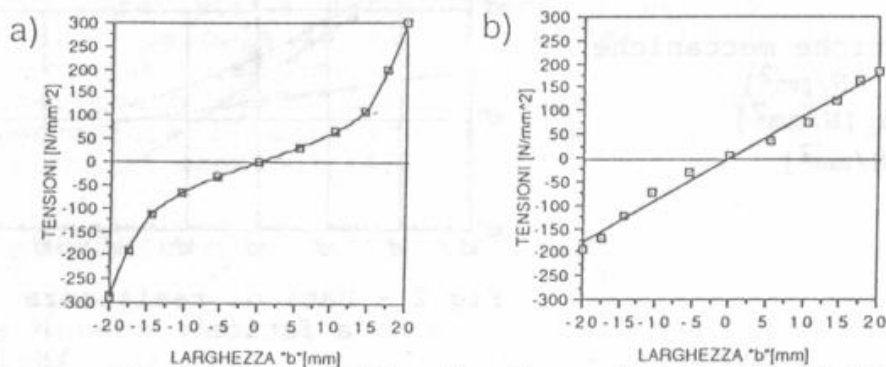


Fig.4 - Stato di sollecitazione lungo il lato "b": a) sezione posta all'inizio del raccordo, b) sezione indisturbata.

I componenti realizzati secondo il disegno riportato in fig.1 sono stati montati sulla attrezzatura di prova, fig.5, che permette di riprodurre le effettive condizioni di lavoro.

Il ciclo di sollecitazione è ottenuto con la pressurizzazione alternata delle camere del cilindro idraulico che, per la sua configurazione geometrica, genera un rapporto fra le tensioni estreme pari a $R = -0.808$.

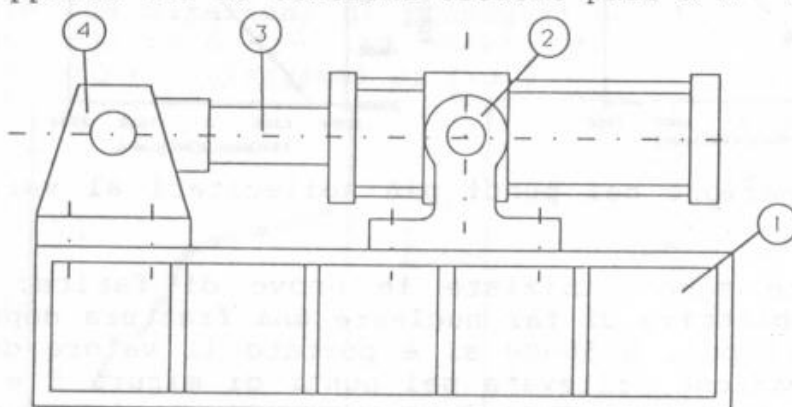


Fig.5 - Attrezzatura di prova: 1) Profilato HE 260 UNI 5397, 2) Supporto a staffa del collare, 3) Stelo, 4) Fissaggio dello stelo.

Degli estensimetri elettrici a resistenza sono stati posizionati nella zona di raccordo in maniera da determinare la deformazione locale presente nella staffa e sullo stelo del cilindro per misurare il valore globale della forza che si trasmette alle staffe, fig.6. Inoltre sono stati applicati dei "crack gauges" nelle zone di sovrasollecitazione in cui è prevista la nucleazione della frattura.

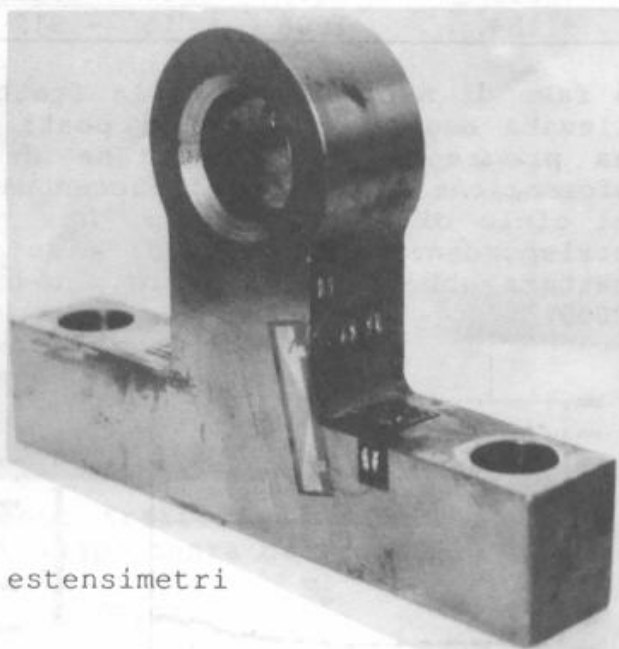
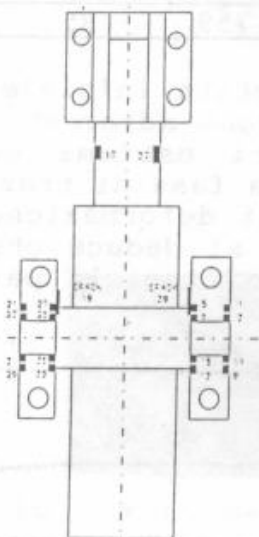


Fig.6 - Disposizione degli estensimetri e del crack gauge.

3 - RISULTATI SPERIMENTALI

Le prime prove effettuate sono state di carattere statico con valori della forza crescenti e l'andamento rilevato delle deformazioni nei punti più sollecitati delle due staffe è riportato nei diagrammi di fig.7 da cui si può rilevare il dato relativo alla sovratensione.

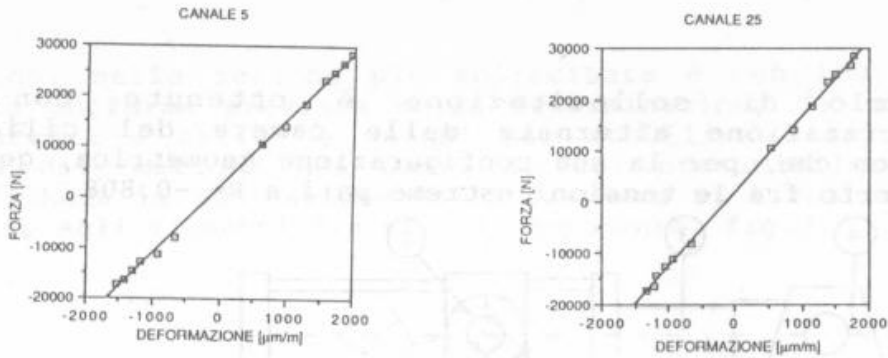


Fig.7 - Deformazione nei punti più sollecitati al variare della forza.

Successivamente sono iniziate le prove di fatica; per realizzare l'obiettivo di far nucleare una frattura dopo un numero di cicli pari a 50000 si è portato il valore della massima deformazione, rilevata nei punti di misura 5 e 25, al valore precedentemente calcolato come mostrato in tab.II.

Tab.II Valori estremi delle deformazioni rilevate. [$\mu\text{m/m}$]

STAFFA 1		(can.)	STAFFA 2		(can.)
1541	-1422	1	1587	-1465	21
1164	-1074	3	846	-780	23
2087	-1696	5	2111	-1571	25
1198	-1014	7	1104	-868	27
-1535	1118	9	-1473	1142	29
-942	669	11	-1068	749	31
-2015	1607	13	-1953	1650	33
-1184	1008	15	-912	759	35

La fase di nucleazione della frattura è stata inizialmente rilevata dagli estensimetri posti nelle zone adiacenti con una progressiva diminuzione dei valori estremi della deformazione misurata, più accentuata nella fase di trazione del ciclo di fatica, fig.8. Dai valori di deformazione in corrispondenza del punto di misura n° 13 si deduce che la frattura abbia avuto inizio per un numero di cicli pari a 40000.

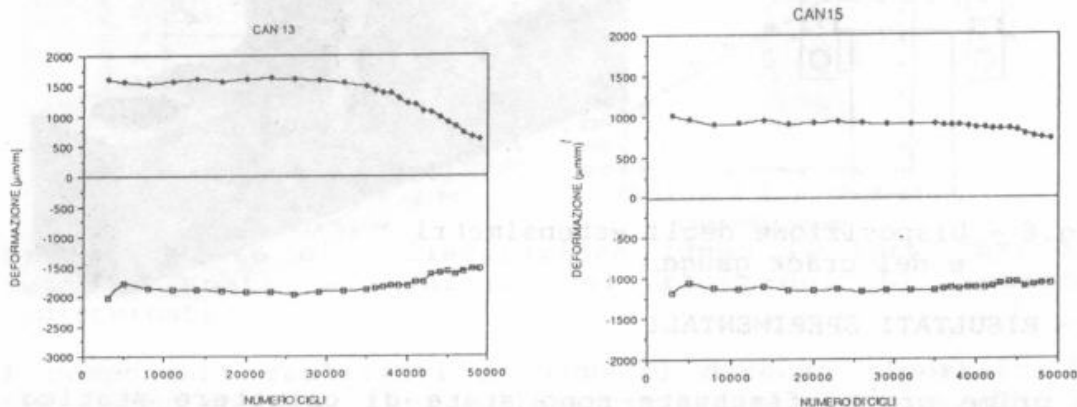


Fig.8 - Deformazioni estreme in corrispondenza della zona di frattura.

La successiva fase di propagazione della frattura che si è sviluppata da uno spigolo della zona di raccordo, è stata seguita tramite i crack gauges applicati. L'avanzamento nelle due direzioni di propagazione della frattura, che è stato rilevato fino ad numero di cicli pari a 77000, è riportato nei diagrammi di fig.9.

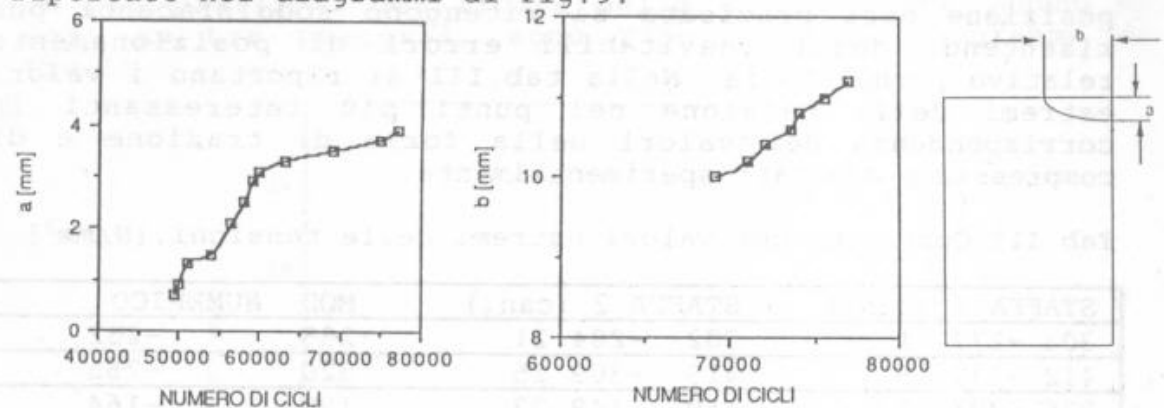


Fig.9 - Avanzamenti della frattura nelle due direzioni di propagazione.

La fig.10 mostra l'elemento fratturato con il crack gauge applicato.

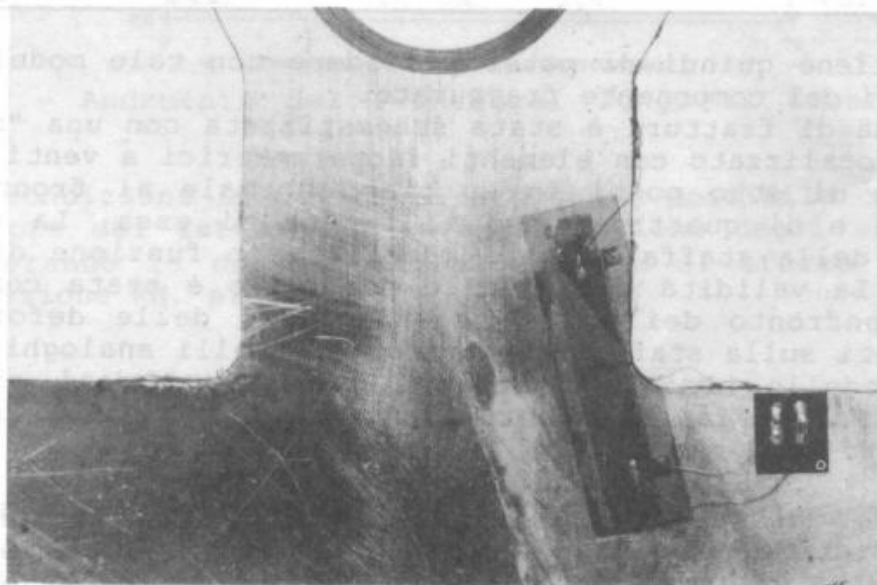


Fig.10 - Foto dell'elemento fratturato: si può notare la frattura propagatasi in corrispondenza del raccordo.

4 - RISULTATI DELL'ANALISI NUMERICA

Per precisare la distribuzione delle forze che perno del collare e staffa si scambiano nel contatto, è stato necessario tener conto dei risultati estensimetrici. Nello scambio delle forze il perno si comporta come una mensola incastrata e quindi ripartisce il carico, che possiamo considerare distribuito in una generatrice, in maniera non uniforme.

Agendo in maniera iterativa si sono applicate al modello con intaglio distribuzioni del carico ripartito lungo lo spessore secondo diversi tipi di leggi e si sono confrontati i valori ottenuti sperimentalmente con gli analoghi del modello numerico. I risultati numerici con la forza nella posizione così precisata si ritengono soddisfacenti pur risentendo degli inevitabili errori di posizionamento relativo perno-staffa. Nella tab.III si riportano i valori estremi della tensione nei punti più interessanti in corrispondenza dei valori della forza di trazione e di compressione adottati sperimentalmente.

Tab.III Confronto dei valori estremi delle tensioni. [N/mm²]

STAFFA 1 (can.)	STAFFA 2 (can.)	MOD. NUMERICO
303 -277 1	302 -284 21	285 -232
412 -330 5	413 -309 25	320 -265
226 -207 3	160 -149 23	190 -164
234 -186 7	219 -161 27	200 -160
-277 222 9	-292 215 29	-275 216
-395 330 13	-392 332 33	-310 250
-171 130 11	-204 145 31	-190 142
-237 189 15	-158 125 35	-196 150

Si ritiene quindi di poter procedere con tale modello alla analisi del componente fratturato.

La zona di frattura è stata schematizzata con una "mesh" di tipo focalizzato con elementi isoparametrici a venti nodi in numero di otto posti in un piano normale al fronte della cricca e di quattro lungo il fronte di essa. La restante parte della staffa è stata modellata in funzione di questa zona. La validità del modello costruito è stata confermata dal confronto dei valori sperimentali delle deformazioni rilevati sulla staffa fratturata con quelli analoghi forniti dal modello. Possiamo infatti notare dai dati riportati dalla tab.IV la buona corrispondenza fra i valori ottenuti con i diversi metodi.

Tab.IV Confronto dei valori delle tensioni nella staffa fratturata. [N/mm²]

SPERIMENTALE	MOD. NUMERICO
-278	-250
-213	-207
-328	-275
-198	-205
232	224
141	140
47	57
103	82

Con il modello messo a punto è stato possibile determinare il J-Integral relativo alla frattura schematizzata e tale valutazione è stata condotta in campo lineare elastico.

I valori del J-Integral sono ottenuti correlando le tensioni agli spostamenti nel metodo agli elementi finiti con una adatta regola di interpolazione per più percorsi attorno all'apice della cricca in modo da verificare la stabilità della soluzione. I valori ottenuti del J-Integral, valutati in più posizioni del fronte della cricca e per ognuno di essi su tre percorsi, sono riportati nel diagramma di fig.11.

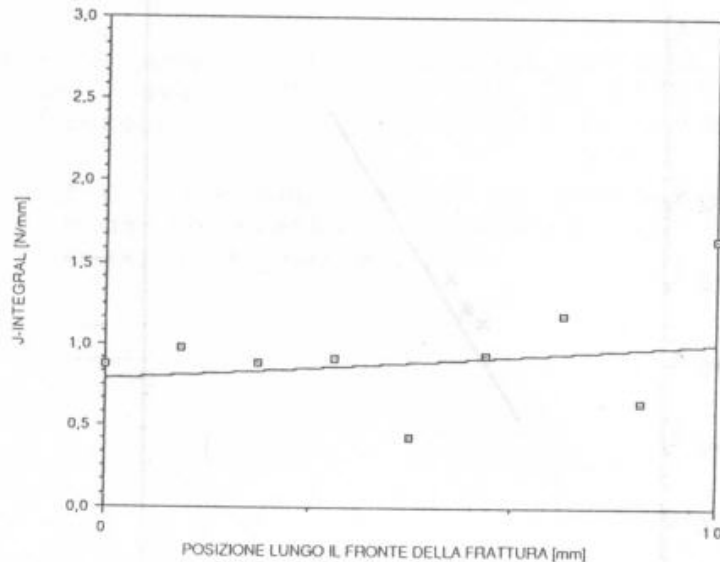


Fig.11 - Andamento del J-Integral lungo il fronte della cricca.

Nelle condizioni in cui ci si è posti è possibile calcolare il valore del fattore di intensificazione degli sforzi K_I considerando le due situazioni estreme di sforzo K_s e di deformazione K_d , piani:

$$K_s = \sqrt{EJ}$$

$$K_d = \sqrt{\frac{EJ}{1-\nu^2}}$$

Tali valori, ottenuti in queste condizioni, presentano delle difficoltà di interpretazione e di correlazione con i dati reperibili in bibliografia. Infatti ci troviamo in presenza di uno stato di sollecitazione non semplice e di una azione flettente nella sezione contenente la frattura. Se la prima parte di nucleazione è stata prevista con sufficiente approssimazione, risulta difficile precisare la successiva fase di propagazione per mancanza di dati che comprendano i parametri coinvolti nel caso in esame. Con i dati a disposizione, avanzamento della frattura rilevato sperimentalmente e il valore della variazione del fattore di intensificazione degli sforzi ottenuto dall'analisi numerica, si è costruita una porzione del diagramma della velocità di propagazione della frattura, fig.12.

Nella costruzione di tale diagramma si è assunta come valida l'ipotesi che durante la fase di compressione (cricca chiusa) non si abbia propagazione della cricca.

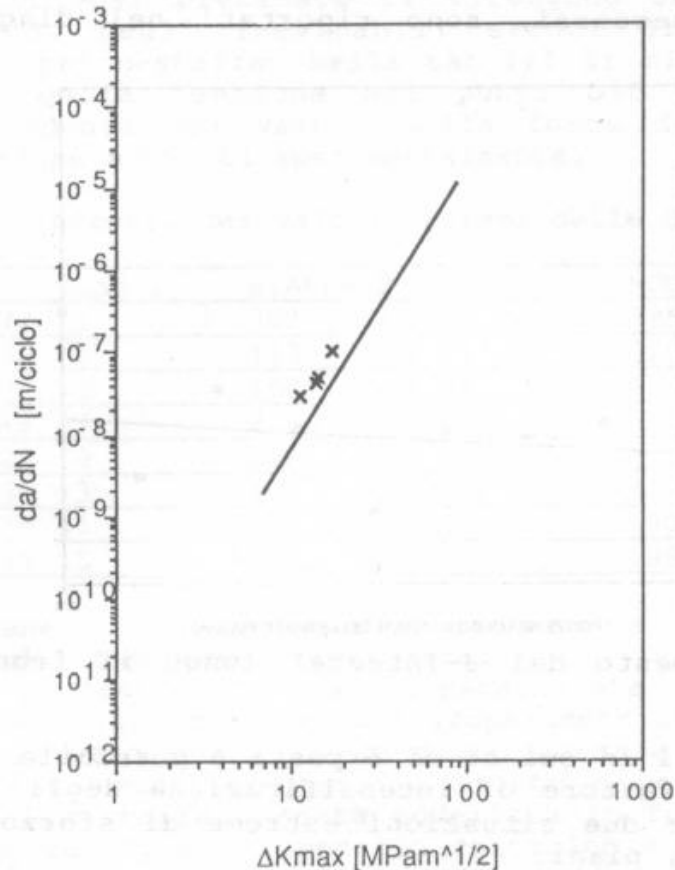


Fig.12 - Velocità di propagazione della frattura. Il tratto continuo indica la curva di Paris relativa al materiale ricavata in condizioni standard.

5 - CONCLUSIONI

La corrispondenza trovata tra i valori ricavati sperimentalmente sull'elemento contenente la cricca e gli analoghi relativi al suo modello agli elementi finiti in campo lineare elastico ha confermato la validità dello studio per caratterizzare un elemento meccanico in condizioni di funzionamento reali. Il modello sviluppato successivamente ha permesso di precisare il valore del J-Integral e quindi di determinare alcuni valori della velocità di propagazione della cricca. Il confronto, se pur in un campo limitato di ΔK_{max} , di questi dati con quelli del materiale permette di effettuare una previsione della vita residua della staffa nelle condizioni operative.

6 - BIBLIOGRAFIA

[1] Boller Chr., Seeger T., "Materials Data for Cyclic Loading", Elsevier Science Publisher B.V., 1987, Amsterdam

[2] Milne I., Ainsworth R.A., Dowling A.R., Stewart A.T., "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects", CEGB report R/H/R6 rev. 3, 1986

[3] ABAQUS - "A General Purpose Linear and Nonlinear Finite Element Code, User's Manual", ver. 4.6 1987, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Providence, R.I.

[4] Pickard A.C., "The Application of 3-Dimensional Finite Elements Methods to Fracture Mechanics and Fatigue Life Prediction", Emas, 1986, Warley, U.K.