

IGF 12 - XII Convegno Nazionale
Gruppo Italiano Frattura
Parma, 12-13 Giugno 1996

**APPLICAZIONE DELL'ENGINEERING TREATMENT MODEL
ALLA PROPAGAZIONE DI UN DIFETTO IN MODO MISTO**

A. Pironi, C. Dalle Donne***

*Dipartimento di Ingegneria Industriale - Università di Parma
Viale delle Scienze - 43100 Parma, Italia

**Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Werkstoff-Forschung
Linder Höhe - D-51147 Köln, Germania

SOMMARIO

In questo lavoro si intende presentare un modello (Engineering Treatment Model, ETM) per la valutazione di strutture difettate. La capacità del modello di stimare parametri di meccanica della frattura in condizioni di carico generali, quali normalmente si verificano in elementi meccanici, è stata verificata confrontando i valori forniti dall'ETM con dati sperimentali di propagazione in modo misto I/II di provini CTS (Compact Tension Shear). Per provarne la generalità, lo si è applicato a due materiali differenti, un acciaio ferritico e una lega di alluminio. Si è rilevato, specialmente per quanto riguarda l'acciaio, un buon accordo tra dati analitici e sperimentali.

1. INTRODUZIONE

Negli anni più recenti alle regole di progettazione classiche, basate essenzialmente sul progetto e verifica a resistenza del materiale, si è affiancato l'approccio fondato sulla meccanica della frattura. L'interesse di tale approccio risiede nel fatto che è possibile progettare o verificare un componente meccanico in base alle difettosità pregresse o sviluppatasi in esercizio, la cui influenza sulla funzionalità del componente stesso non è quantificabile mediante una semplice verifica a resistenza.

L'utilizzo di tali concetti si scontra però spesso con la mancanza di soluzioni analitiche per i parametri caratterizzanti la frattura (K , δ , J) nelle specifiche geometria e condizioni di carico. Lo sviluppo di codici di calcolo ad elementi finiti di sofisticazione

crescente ha permesso di superare almeno parzialmente questo problema, fermo restando che nella progettazione meccanica occorre quasi sempre un compromesso tra tempo, risorse impiegate e precisione del risultato.

L'Engineering Treatment Model (ETM) [1] è un modello analitico per la stima dei valori assunti da parametri di meccanica della frattura elasto-plastica, quali l'apertura all'apice della cricca δ_s e l'integrale J e la conseguente valutazione delle condizioni di una struttura difettata. L'idea fondamentale è di avere a disposizione uno strumento di rapido utilizzo per la stima delle condizioni di un componente difettato, a scapito della precisione nel dettaglio. In questo lavoro i concetti dell'ETM sono stati applicati generalizzandoli a condizioni di modo misto I/II, quali si possono avere normalmente in un componente meccanico.

2. L'ENGINEERING TREATMENT MODEL (ETM)

L'ETM ha iniziato il suo sviluppo alla fine degli anni '80 presso il centro di ricerca GKSS di Geestacht (Germania). Il suo utilizzo è volto prevalentemente al campo della frattura elasto-plastica, dove risulta più difficile la stima dei parametri caratterizzanti lo stato del componente. Innanzitutto si assume che sia prevalente uno stato piano di tensione e si approssima la curva caratteristica del materiale oltre il limite plastico con una legge di potenza:

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} \right)^n \quad (1)$$

In condizioni di plasticizzazione limitata rispetto alla parte residua di struttura ($0.5 < F/F_y < 1$) si utilizzano le soluzioni lineari elastiche, con lunghezza della cricca corretta per tenere conto della zona plastica, eq. 2,

$$\delta_s = \frac{K_{\text{eff}}^2}{ER_{p0.2}} = \frac{J}{R_{p0.2}} \quad (2)$$

dove

$$K_{\text{eff}} = Y_{(a_{\text{eff}}/w)} \sigma \sqrt{\pi a_{\text{eff}}} \quad (3)$$

e

$$a_{\text{eff}} = a + \frac{K^2}{2\pi R_{p0.2}^2} \quad (3)$$

In caso di plasticizzazione estesa ($F/F_y > 1$) si assume che i parametri aumentino con una legge di potenza il cui esponente dipende da quello della curva caratteristica, eqq. 4 e 5.

* δ_s [2] è l'apertura all'apice della cricca misurata su un intervallo di 5mm centrato sull'apice iniziale della stessa.

$$** \frac{J}{J_y} = \left(\frac{F}{F_y} \right)^{(1+n)/n} \quad (4)$$

$$** \frac{\delta}{\delta_{sy}} = \left(\frac{F}{F_y} \right)^{1/n} \quad (5)$$

Il carico di inizio propagazione si ottiene sostituendo nelle formule suddette il valore critico δ_{5c} o J_c , mentre quello massimo si determina dalla condizione di tangenza delle stesse con la curva R del materiale, con l'avvertenza di variare F_y in funzione di a .

3. APPLICAZIONE DELL'ETM IN CONDIZIONI DI MODO MISTO I/II

3.1. Equazioni ETM in condizioni di modo misto I/II

Secondo le simulazioni col metodo degli elementi finiti di [3,4], e le esperienze sperimentali di [5], un parametro che caratterizza la frattura elasto-plastica in modo misto I/II è il CTODV (Crack Tip Opening Displacement Vector, δ_v), definito in funzione delle componenti di apertura (I) e spostamento (II) da:

$$\delta_v = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_{II}^2} \quad (6)$$

In questo lavoro δ_v è stato calcolato, nel campo $F/F_y < 1$, secondo un approccio differente da quanto riportato al punto precedente. A partire dalle equazioni del campo lineare elastico di spostamento all'apice della cricca, sono stati calcolati l'apertura $2u = \delta_I$ e lo slittamento $2v = \delta_{II}$ nel punto $r = 0.5\text{mm}$, $\theta = -180^\circ$. La loro introduzione nella eq. 6 fornisce δ_v in funzione dei fattori $K_{I,\text{eff}}$, $K_{II,\text{eff}}$, eq. 7, dove la correzione per la presenza della zona plastica è fornita dalla eq. 8 [6].

$$\delta_v = \frac{4}{E\sqrt{\pi}} \sqrt{K_{I,\text{eff}}^2 + K_{II,\text{eff}}^2} \quad (7)$$

$$a_{\text{eff}} = a + \frac{1}{2\pi R_{p0.2}^2} (K_I^2 + 3K_{II}^2) \quad (8)$$

Un'equazione analoga alla (5) è stata usata per $F/F_y > 1$. L'esponente n è stato calcolato regredendo i dati δ_5-F/F_y di precedenti esperimenti in modo I con provini CT; tale metodologia è giustificata dalla simile condizione di sollecitazione sul legamento residuo tra i suddetti campioni (trazione e flessione) e campioni CTS caricati in modo I.

Formulazioni analitiche di F_y per situazioni geometriche e di carico semplici sono state reperite in [7], incorporando la componente di taglio attraverso un opportuno criterio di resistenza: nel presente caso si è utilizzato il criterio di Tresca. Per la lega di alluminio le formule sopracitate sono state riviste, attraverso opportune ipotesi semplificative, in funzione dell'angolo di deviazione rispetto alla direzione iniziale.

** Con J_y e δ_{sy} si intendono rispettivamente i valori di J e δ_5 in corrispondenza di $F=F_y$.

Infatti, a differenza dell'acciaio che presenta angoli di deviazione sempre inferiori ai 25° , esso propaga pressochè perpendicolarmente alla retta d'azione della forza applicata.

L'analisi è stata estesa anche al CMODV (Crack Mouth Opening Displacement Vector, cod_v) che è l'apertura in un punto prossimo all'estremità libera della cricca. Per $F/F_y < 1$, ne è stata derivata una formulazione analitica con il metodo delle funzioni d'influenza [8], mentre per $F/F_y > 1$ è stata utilizzata ancora la (5).

3.2. Metodologia sperimentale

L'elemento difettato è rappresentato da un provino CTS (Compact Tension Shear) normalmente utilizzato per prove in modo misto I/II, Fig. 1, in cui è stata introdotta una precricca di fatica fino ad $a/W = 0.6$. Per maggiore generalità si sono eseguiti test su due materiali differenti: un acciaio ferritico (DIN StE550) e una lega di alluminio (2024-T3) le cui caratteristiche sono riportate in Tab. 1.

δ_v è stato rilevato in un punto 0.5mm dietro l'apice iniziale mediante un microscopio dotato di apparecchio fotografico. Contemporaneamente, cod_v è stato misurato mediante una coppia di estensometri.

La propagazione complessiva è stata rilevata mediante esame ottico delle superfici di frattura dopo l'esperimento. Valori intermedi sono stati determinati con il metodo della variazione di potenziale elettrico attraverso opportune curve di calibrazione.

3.3. Risultati e discussione

3.3.1. Acciaio ferritico

In generale per questo materiale si può dire che nel campo $F/F_y < 1$ esiste un buon accordo tra valori sperimentali e calcolati di δ_v , se si eccettua la zona nell'intorno di F_y dove le equazioni suddette possono solamente approssimare la transizione del comportamento. Nel campo $F/F_y > 1$ si ha invece una tendenza alla sovrastima, anche se l'andamento sperimentale è rispettato. Come esempio tipico del funzionamento del metodo in condizioni di modo misto, nel grafico in Fig. 2 sono stati sovrapposti i risultati sperimentali e le equazioni (7) e (5) per un angolo di caricamento di 75° .

Il confronto tra i dati sperimentali e analitici di cod_v ha rivelato che nel campo $F < F_y$ la equazione sviluppata (11) segue in generale molto bene i dati fino a F_y , mentre si ha in generale una sovrastima (che però è conservativa) più marcata rispetto al caso di δ_v nel campo $F > F_y$. In Fig. 3 è rappresentato il caso esemplificativo di un angolo del carico di 45° .

3.3.2. Lega di alluminio

In questo materiale è stato riscontrato in generale un minore accordo tra stime analitiche e dati sperimentali rispetto all'acciaio ferritico. Un'analisi del comportamento macroscopico a frattura della lega di alluminio ha portato ad individuare in due punti fondamentali le cause di tale scostamento:

- 1- l'Al2024-T3 comincia a propagare a valori di $F/F_y = 0.4 \div 0.6$ e ciò comporta uno spostamento verso sinistra e una "smussatura" del punto di transizione rispetto a quanto visto in precedenza per l'acciaio;
- 2- la propagazione in questo materiale avviene quasi perpendicolarmente alla retta d'azione del carico, per cui pone una serie di interrogativi sulla formulazione analitica di

F_y . Per approfondire questo punto è stata determinata una curva F_y sperimentale utilizzando provini di Al99 (basso incrudimento) tagliati in direzione inclinata rispetto al piano iniziale (cioè simulando un difetto avanzante non co-planarmente); l'utilizzo di tale curva al posto delle formule ricavate da [6] ha fornito una maggiore corrispondenza tra dati sperimentali e calcoli, Fig. 4.

4. CONCLUSIONI

I valori calcolati secondo il modello ETM di δ_v e di cod_v per l'acciaio ferritico risultano in buon accordo con quelli sperimentali, mentre per la lega di alluminio, probabilmente a causa della propagazione non co-planare che normalmente si ha in questo materiale, le indicazioni fornite dal modello sono solo qualitativamente comparabili. In particolare, con una formulazione maggiormente precisa di F_y si potrebbero ottenere migliori risultati. La tecnica di simulazione agli elementi finiti sembra essere la strada più diretta per ottenere informazioni più precise su F_y e cod_v anche in condizioni di propagazione non co-planare. A tal proposito è in fase di sviluppo un modello EF del provino CTS che permetta di simulare una propagazione con cricca deviante.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] K.H. SCHWALBE, A. CORNEC, "The Engineering Treatment Model (ETM) and its practical application", Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 14, No.4, pp. 405-412, 1991.
- [2] D. HELLMANN, K.H. SCHWALBE, "Geometry and size effects on J-R and δ -R curves under plane stress conditions", ASTM STP 833, pp. 577-605.
- [3] M. SAKA, S. TANAKA, "Strain and stress fields near the blunted tip of a crack under mixed-mode loading and the implications for fracture", Mechanics of Materials, Vo. 5, 1986, pp. 331-338.
- [4] A.K. GHOSAL, R. NARASHIMAN, "A finite element study of mixed-mode fracture initiation by ductile failure mechanisms", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 42, No. 6, 1994, pp. 953-978.
- [5] C. DALLE DONNE, H. DÖKER, "Plane stress crack resistance curves of an inclined crack under biaxial loading", Symposium on multiaxial fatigue and testing techniques, 15 May, 1995, Denver, Colorado, USA. ASTM STP 1280 (to be published).
- [6] L.P. POOK, "The Effect of Crack Angle on Fracture Toughness", Engineering Fracture Mechanics, 3, 1973, pp. 205-218.

- [7] A.G. MILLER, *International Journal of Pressure Vessel and Pipings*, 32, 1988, pp. 197-327.
- [8] H. TADA, P.C. PARIS, G.R. IRWIN, *"The stress analysis of cracks handbook"*, Paris Prod. Inc., 2nd Ed., 1985.

Tab. 1: resistenza meccanica dei materiali testati.

Materiale	$R_{p0.2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A_m (%)
DIN StE 550	580	650	13
Al2024-T3	370	440	20

Fig. 1: provino utilizzato negli esperimenti.

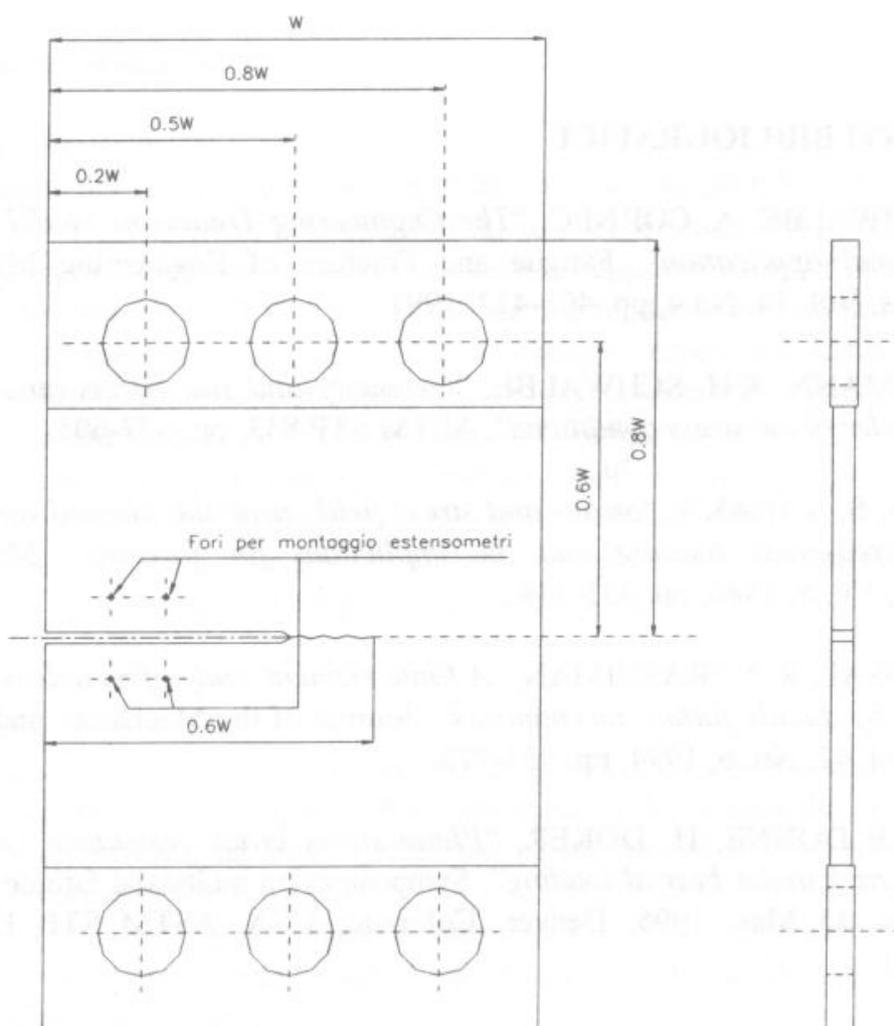


Fig. 2: δ_v sperimentale e calcolato per un angolo di carico $\alpha = 75^\circ$ (StE 550).

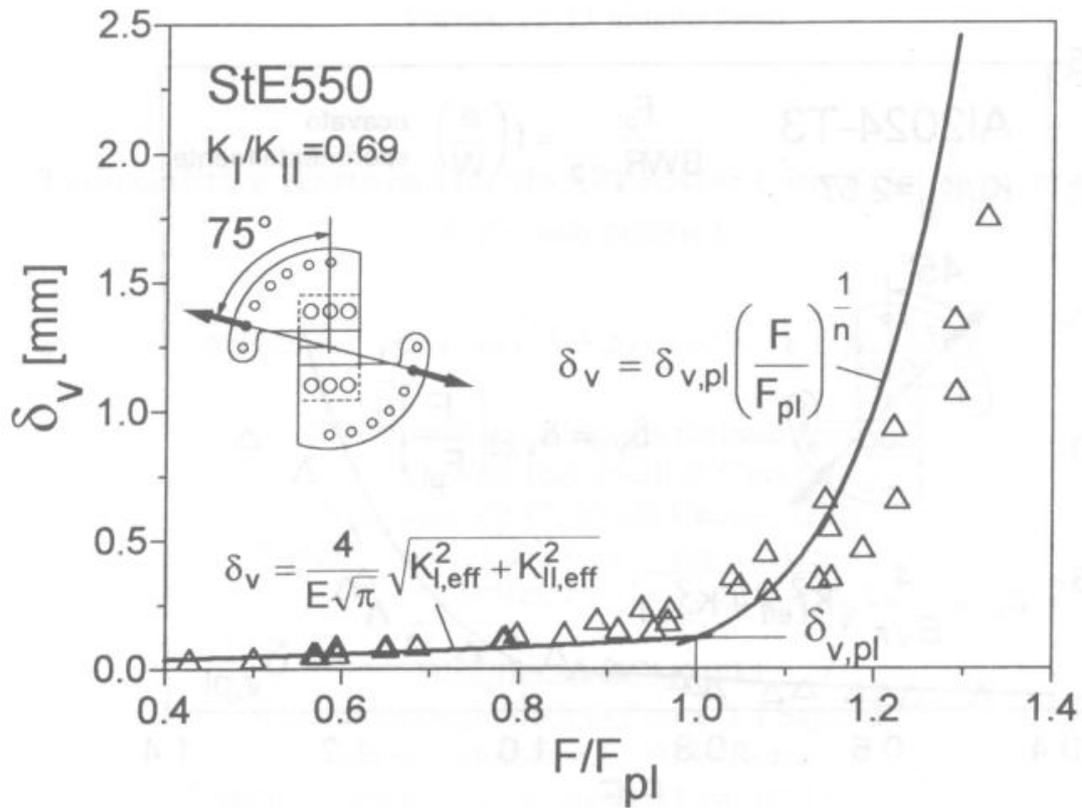


Fig. 3: δ_{mv} sperimentale e calcolato per un angolo di carico $\alpha = 45^\circ$ (StE 550).

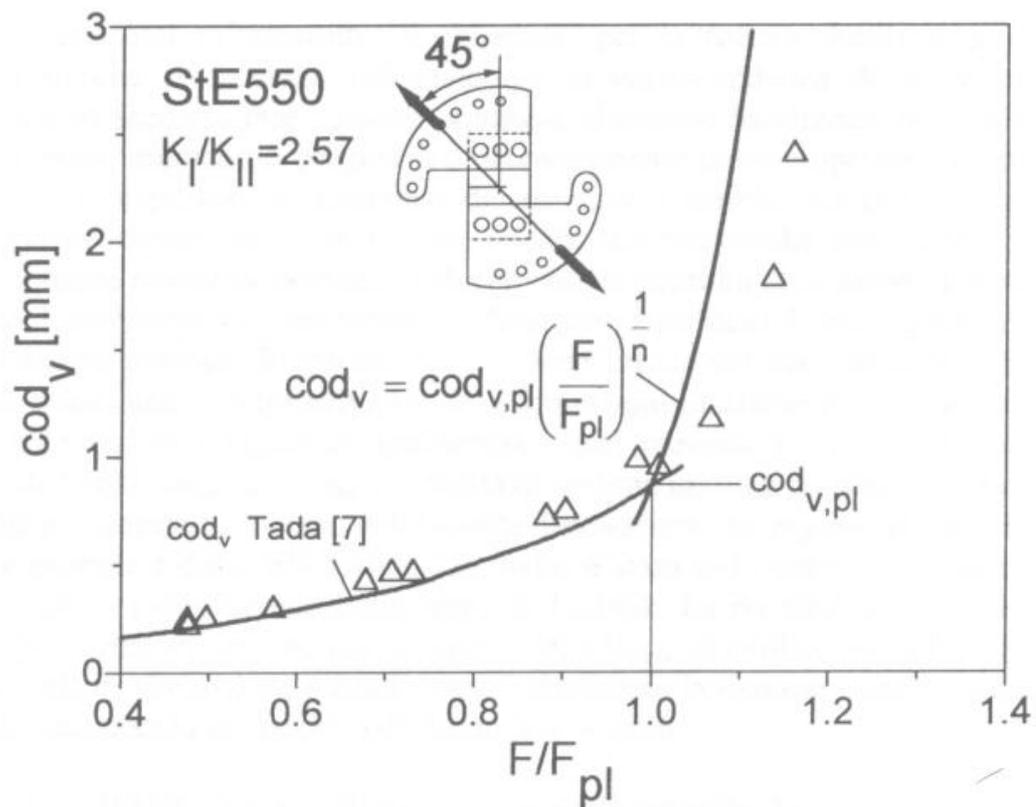


Fig. 4: δ_{mv} sperimentale e calcolato per un angolo di carico $\alpha = 45^\circ$ (Al 2024-T3); F_y ricavato sperimentalmente.

