

SIMULAZIONE MEDIANTE CTOA DELLA FRATTURA DUTTILE IN STRUTTURE SOTTILI SALDATE

D. Fersini^a, A. Pirondi^a, G. erbini^a

^a*Dipartimento di Ingegneria Industriale, Viale G.P. Usberti, 181/A - 43100 Parma (Italy)*
fersini@ied.unipr.it, pirondia@unipr.it, giorgiaZ10@libero.it

SOMMARIO

Negli ultimi anni lo studio della resistenza alla frattura delle strutture sottili integrali (i.e. saldate) sta assumendo sempre maggiore importanza in virtù delle applicazioni che queste strutture trovano nel settore dei trasporti, in particolare in aeronautica. L'obiettivo del presente lavoro, svolto in collaborazione con EADS (Monaco, Germania), è quello di verificare la possibilità di prevedere, tramite il criterio CTOA (Crack Tip Opening Angle), il comportamento delle strutture saldate di grandi dimensioni partendo da test condotti su piccoli provini Kahn non precriccati.

Partendo dalle caratteristiche del materiale e dalle curve Forza-COD ricavate presso EADS, il valore del CTOA in funzione della lunghezza di propagazione è stata tarato per confronto tra simulazione e dati sperimentali. Il valore del CTOA così trovato, in particolare il valore stabilizzato dopo la prima fase a CTOA decrescente, è stato utilizzato per prevedere il comportamento di grandi pannelli piani precriccati.

ABSTRACT

In the last years the fracture behavior of integral (i.e. welded) thin-walled structures is receiving an increasing interest for its implication in transportation industry, especially aerospace. The aim of this work, made in cooperation with EADS (Munich, Germany) is the assessment of the efficiency of Crack Tip Opening Angle (CTOA) with respect to the transferability from a geometry to another, in particular the results obtained from Kahn tear tests to M(T) panels. The load-displacement behavior recorded during Kahn tear test was reproduced by means of finite element analysis using a variable CTOA as a function of crack length: in the first mms of crack propagation the CTOA decreases and then meets a constant value. This constant CTOA extracted from Kahn tests has then been used to simulate the R-curve of large, cracked flat panels.

1. INTRODUZIONE

Le strutture sottili utilizzate nell'industria aeronautica devono subire un ampio processo di qualifica che comprende anche la determinazione del carico residuo in presenza di difetti. In questo tipo di strutture la concomitanza dello spessore sottile, del basso carico di snervamento e della elevata tenacità a frattura sono tali che il parametro K non è più in grado di descrivere correttamente il processo di frattura.

Per questo motivo la propagazione stabile della cricca nelle strutture metalliche sottili è stato diffusamente studiato negli ultimi anni tramite le metodologie della MFEP (Meccanica della Frattura Elasto-Plastica) e diversi criteri come il fattore di intensità degli sforzi effettivo, K_{eff} l'integrale J, l'apertura all'apice (CTOD) e l'angolo di apertura all'apice (CTOA). Tra tutti questi il CTOA ed il CTOD, mostrati in figura 1, ad una certa distanza dall'apice della cricca si sono dimostrati molto efficaci nella modellazione della propagazione stabile e dell'instabilità durante il processo di frattura [1,2].

Il criterio del CTOA si basa su alcune assunzioni: i) dopo la nucleazione non si ha più *blunting* all'apice della cricca, ii) il campo di deformazioni all'apice è descritto dall'angolo di apertura tra le due facce della cricca stessa che quindi può essere assunto come un criterio per la propagazione.

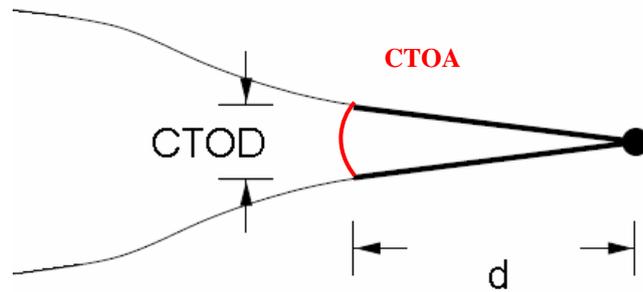


Figura 1. Rappresentazione schematica del CTOA e del CTOD.

Diversi autori [4-6] hanno dimostrato che il CTOA si mantiene costante durante la propagazione stabile di una cricca fatta eccezione per una prima fase in cui esso ha un andamento decrescente per una lunghezza di propagazione pari ad 1 o 2 volte lo spessore. Il dibattito sulla prima fase di propagazione a CTOA decrescente è ancora aperto [7-9], tuttavia Newman [7] ha dimostrato che un CTOA costante è in grado di prevedere con una approssimazione inferiore al 10% i risultati sperimentali. Inoltre il CTOA sembra essere indipendente dalla geometria e dalle dimensioni del provino a patto che la lunghezza della cricca e del legamento residuo siano pari ad almeno 4 volte lo spessore come indicato anche in una recente proposta congiunta di ISO ed ASTM per la standardizzazione delle prove di CTOA [11]. Questo rende il CTOA un criterio utilizzabile per i problemi di trasferibilità, ossia la caratterizzazione di un materiale tramite prove condotte su piccoli provini e la possibilità di estendere i risultati a strutture a grossa scala rappresentate, ad esempio, dai provini M(T) utilizzati nella qualifica di materiali e strutture aeronautiche. Tutto questo a differenza del classico approccio basato sulla definizione di una curva di resistenza che lega la tenacità a frattura all'avanzamento del difetto, per i quali è assodata la dipendenza dalle condizioni di carico e dalla geometria del provino, come evidenziato dallo schema in figura 2.

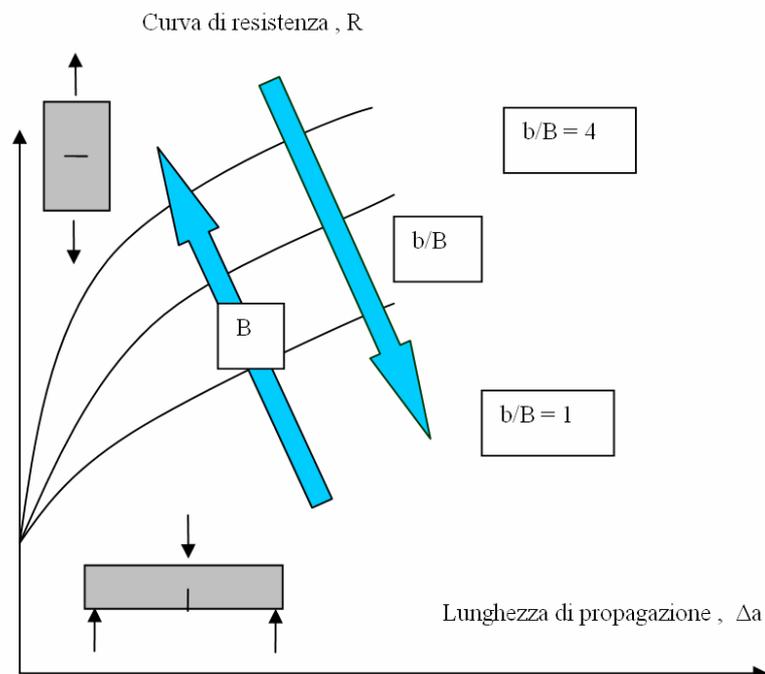


Figura 2. Influenza della geometria e delle condizioni di carico sulla curva di resistenza.

Il problema della trasferibilità dei risultati delle prove del Kahn test è già stato affrontato da Besson tramite un modello micromeccanico di Rosselieur modificato, che include la plasticità anisotropa e la nucleazione di vuoti intorno alle particelle di fase secondaria [13], ottenendo dei buoni risultati nonostante i pannelli M(T) avessero mostrato un certo buckling.

Anche Bucci [15] ha affrontato lo stesso problema tramite il criterio dell'area di apertura critica ottenendo dei risultati incoraggianti.

Questo stesso problema è già stato trattato dagli stessi autori in un precedente lavoro [16] su provini in lega d'alluminio Al6013-T6 in cui il CTOA è stato inizialmente ricavato tramite una procedura trial-and-error riproducendo i risultati sperimentali ottenuti sui provini Kahn. L'andamento del CTOA in funzione della lunghezza di propagazione si è sempre mostrato decrescente nelle prime fasi di propagazione, mentre dopo pochi millimetri questo converge ad un valore che poi si mantiene costante nella successiva fase di propagazione. Il CTOA così tarato è stato quindi applicato per la previsione delle curve di resistenza dei provini M(T) di diverse dimensioni. In particolare il CTOA tarato sui provini Kahn si è mostrato in grado di prevedere con buona precisione il comportamento dei provini M(T) più piccoli, mentre per la previsione dei provini M(T) di dimensioni maggiori è stato necessario utilizzare un CTOA più elevato. I risultati del lavoro precedente hanno comunque confermato la possibilità di prevedere il comportamento dei provini M(T) con un CTOA costante.

Lo scopo del presente lavoro è la valutazione della capacità del CTOA di prevedere il comportamento di grandi pannelli M(T) a partire dai risultati di propagazione ottenuti su piccoli provini Kahn in lega d'alluminio Al2098 saldato con metodologia FSW. È opportuno specificare che i provini Kahn utilizzati non erano precriccati, quindi nella prima parte della prova non rispettano i requisiti indicati da ISO ed ASTM. Tuttavia la possibilità di utilizzare provini molto piccoli e test molto economici per la caratterizzazione di un materiale può essere molto importante da un punto di vista industriale.

2. DATI SPERIMENTALI

I dati sperimentali sono stati forniti da EADS Corp Research Centre, Monaco (D). Il materiale è una lega d'alluminio Al2098 saldata con la metodologia FSW, in direzione T-L. La curva di trazione del materiale che è rappresentativa delle caratteristiche globali del giunto e quindi non tiene conto delle deformazioni localizzate nella TMH, è mostrata in figura 3. Questo tipo di materiale è considerato non saldabile con le metodologie di giunzione tradizionale, ma la saldatura FSW permette di ottenere una efficienza di saldatura molto elevata. Le figure 4 e 5 mostrano rispettivamente le caratteristiche geometriche dei provini Kahn ed i risultati delle prove di propagazione effettuate su questo tipo di provino in termini della curva FOR A-COD. Le figure 6 e 7 mostrano rispettivamente le dimensioni e la curva di resistenza elaborata tramite il metodo della cedevolezza in accordo con la normativa ASTM E 561 [14] per i provini M(T).

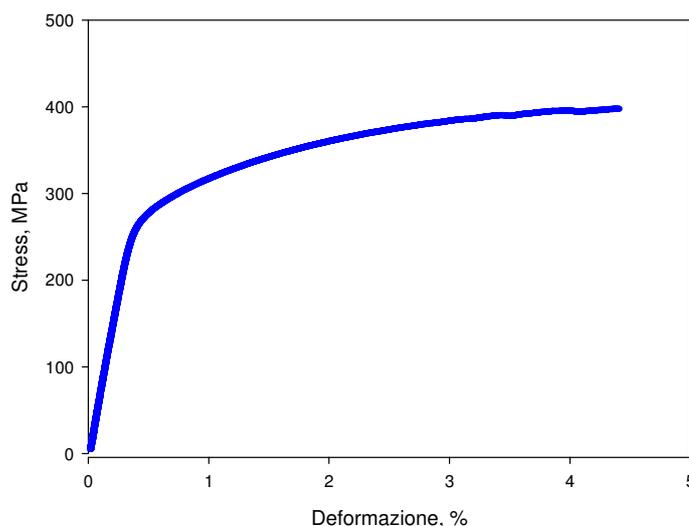


Figura 3. Curva costitutiva del materiale.

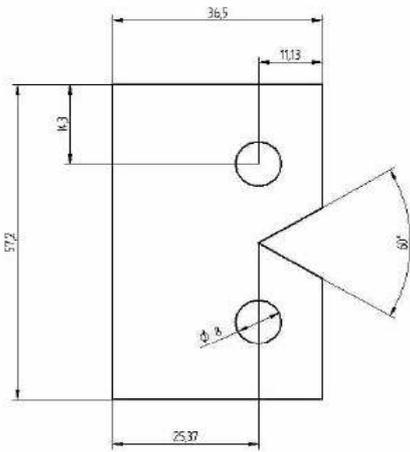


Figura 4. Geometria e dimensioni del provino Kahn.

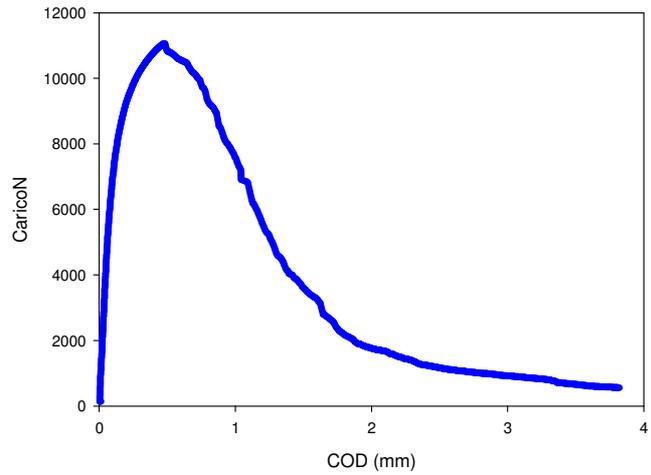


Figura 5. Risultati sperimentali sul provino Kahn.

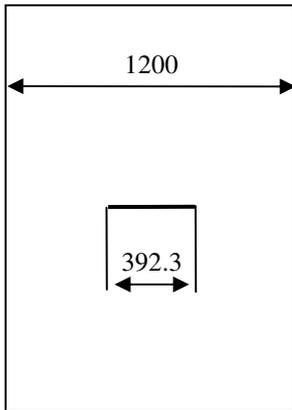


Figura 6. Geometria e dimensioni del provino M(T).

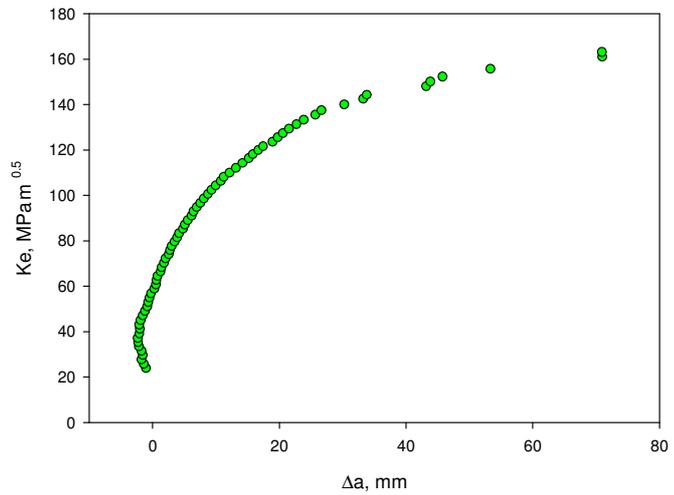


Figura 7. Curva di resistenza sperimentale per i provini M(T)

La curva di resistenza mostrata in figura 7 è stata ricavata in accordo con il K_{eff} indicato nella normativa ASTM E 561 [14]:

$$K_e = \frac{P}{2W} \sqrt{\frac{\pi a_e}{\cos\left(\frac{\pi a_e}{2W}\right)}} \quad (1)$$

essendo P il carico applicato e W la larghezza del provino, mentre a_e è la lunghezza della cricca ricavata tramite il metodo della cedevolezza.

3. MODELLAZIONE NUMERICA

La figura 8 mostra il modello FE sviluppato per il provino Kahn: in virtù della simmetria solo metà provino è stata modellata ed il piano di simmetria coincide con il piano di propagazione della cricca. Il carico è applicato tramite un pin rigido cui è imposto uno spostamento. Tra il pin ed il provino è modellato un contatto del tipo "hard". Il provino, in virtù del piccolo spessore è modellato in condizioni di tensione piana, ma in corrispondenza del piano della cricca è stata modellata una striscia di materiale in deformazione piana per tener conto della triassialità dello stato di sforzo all'apice della cricca. L'inserimento di una striscia di materiale, di altezza pari a circa lo spessore del provino stesso, è stata validata in un precedente lavoro [16] in cui si è dimostrata in grado di fornire risultati migliori, dal punto di vista della trasferibilità dei risultati ad altre geometrie, rispetto alla modellazione dell'intero provino in condizioni di tensione piana.

In corrispondenza del piano di propagazione della cricca sono stati utilizzati elementi lineari ad integrazione completa di dimensione pari a circa 0,5 mm, dimensione tarata tramite apposita analisi di convergenza. La funzionalità DEBOND di Abaqus è stata utilizzata per il rilascio nodale: quando il CTOD ad una distanza di 1 mm dall'apice della cricca raggiunge il valore critico prefissato, il nodo all'apice della cricca è rilasciato per simulare la propagazione della cricca stessa.

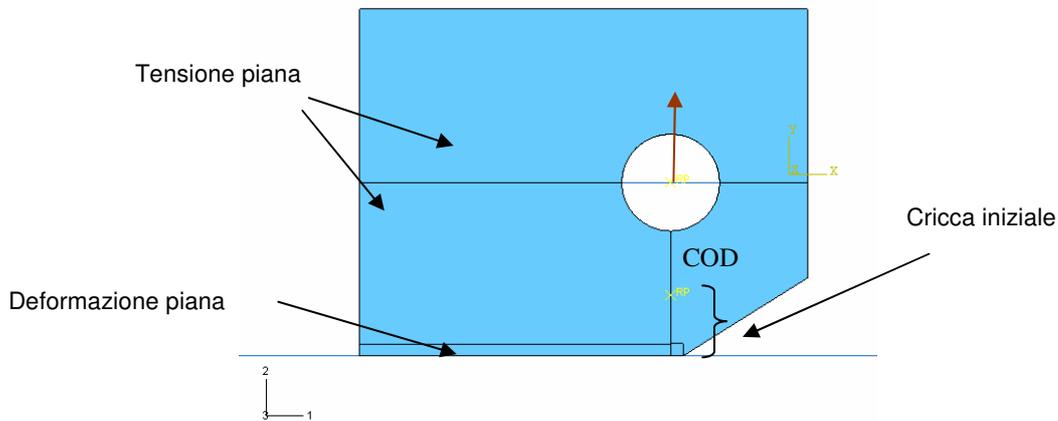


Figura 8. Modelle FEM sviluppato per il provino Kahn.

Solo del provino è stato modellato per la geometria M(T) imponendo i relativi vincoli di simmetria; anche in questo caso in corrispondenza del piano di propagazione è stata modellata una striscia di materiale, di altezza pari allo spessore del provino in condizioni di deformazione piana mentre il resto del provino è stato modellato in condizioni di tensione piana. Nel caso dei provini M(T) la convergenza numerica può essere molto ardua, per questo sono state sviluppate diverse metodologie basate sulla funzionalità STABILE di Abaqus che introduce una dissipazione artificiale concentrata nelle zone di instabilità oppure sulla modificazione dei parametri di convergenza della soluzione numerica. Queste strategie sono state ampiamente descritte in precedenti lavori e sono state tarate per confronto con casi di riferimento disponibili in letteratura [16].

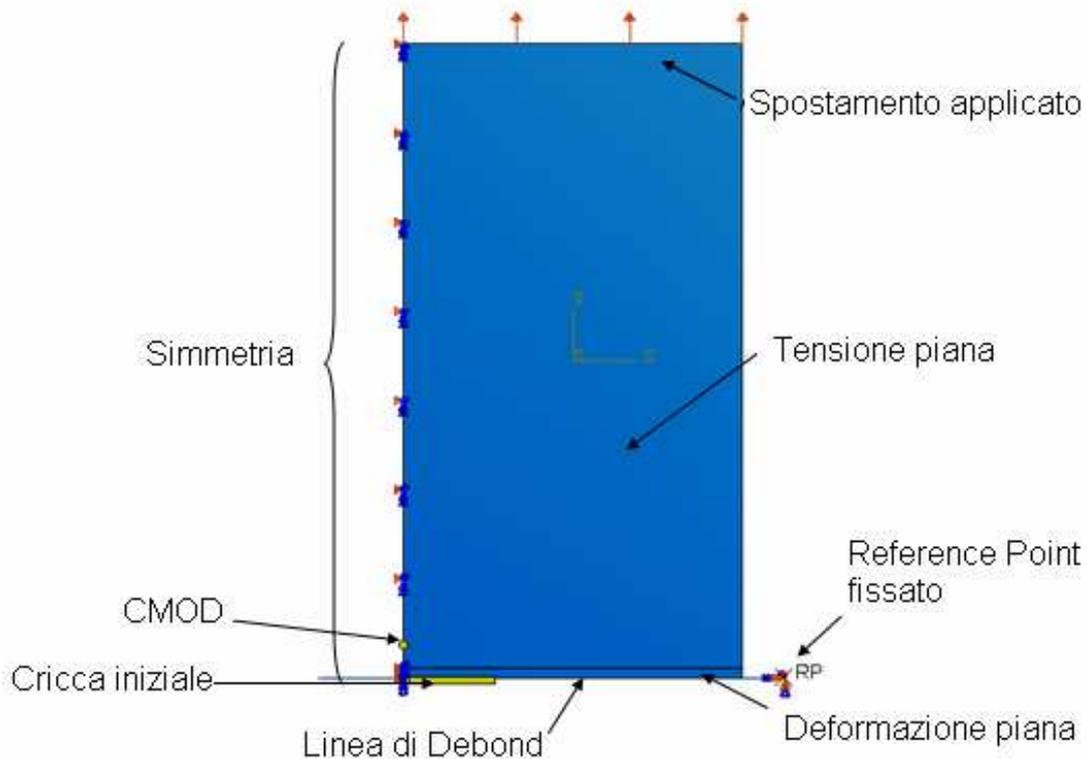


Figura 9. Modelle FEM sviluppato per il provino M(T).

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

Inizialmente il CTOA è stato tarato sui risultati relativi al provino Kahn, con una procedura trial-and-error fino a quando non si è raggiunto un buon fitting dei dati sperimentali. La figura 10 mostra i risultati numerici a confronto con quelli sperimentali ed è mostrato anche l'andamento del CTOA utilizzato in funzione della lunghezza di propagazione della cricca.

Si vede che è stato necessario utilizzare un CTOA crescente nei primissimi mm di propagazione, fino a toccare un valore molto elevato e successivamente si ha una fase decrescente fino a quando dopo circa 7 mm di propagazione si raggiunge una condizione stazionaria che può essere descritta da un CTOA costante pari a circa $7,5^\circ$.

Analogamente a quanto ricavato in precedenti lavori, si può evidenziare che nella prima fase di propagazione di una cricca nel provino Kahn si ha un CTOA molto elevato che decresce molto velocemente dopo pochi millimetri di avanzamento.

Il CTOA dei primi millimetri di propagazione non è significativo ai fini della trasferibilità a geometrie diverse come evidenziato da un recente articolo di Newman e Schalbe [11] in quanto non è rispettato il requisito della lunghezza di cricca pari ad almeno 4 volte lo spessore del provino.

Per questo per lo studio dei grandi provini M(T) è stato assunto un CTOA costante lungo tutta la propagazione pari al valore stabilizzato tarato sui provini Kahn. L'assunzione di un CTOA costante trova riscontro in diversi risultati sperimentali disponibili in letteratura ed ottenuti anche dagli stessi autori in cui si vede che per i provini M(T) un CTOA costante è in grado di prevedere con buona approssimazione la curva di resistenza.

La figura 11 mostra i risultati ottenuti sui provini M(T) con il $CTOA=7,5^\circ$, come determinato dai provini Kahn, e si nota la buona corrispondenza tra i risultati sperimentali e quelli numerici.

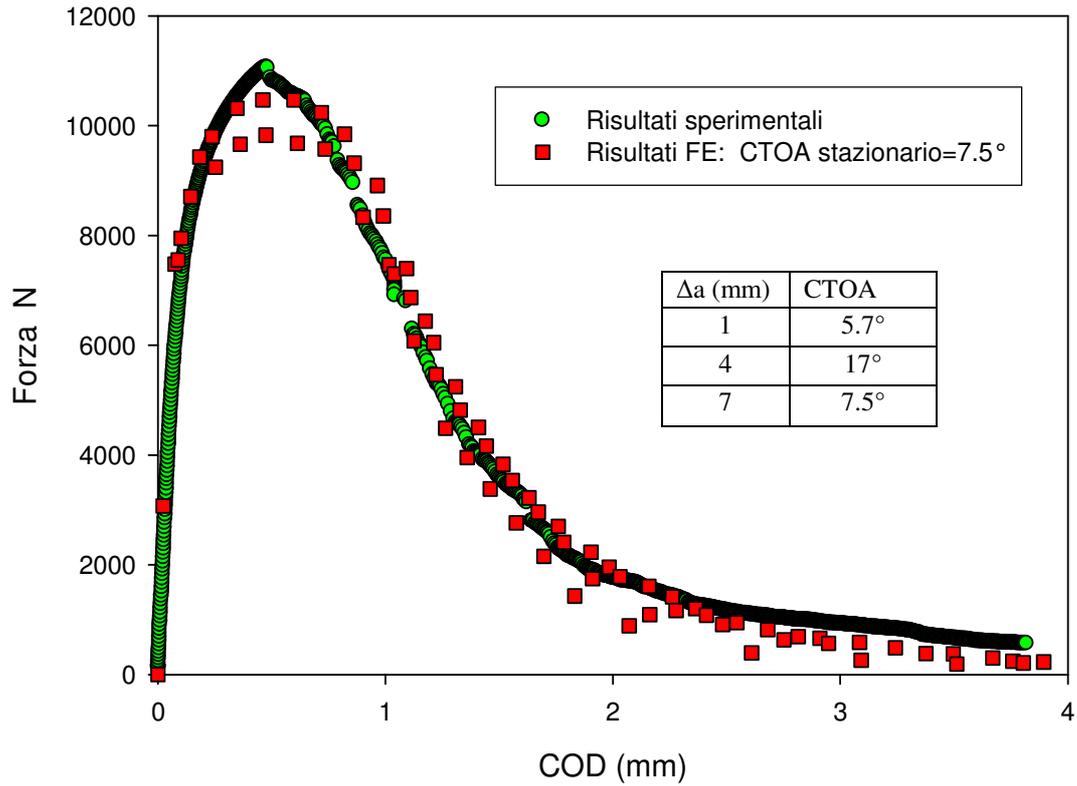


Figura 10. Confronto tra i risultati sperimentali e numerici relativi al provino Kahn.

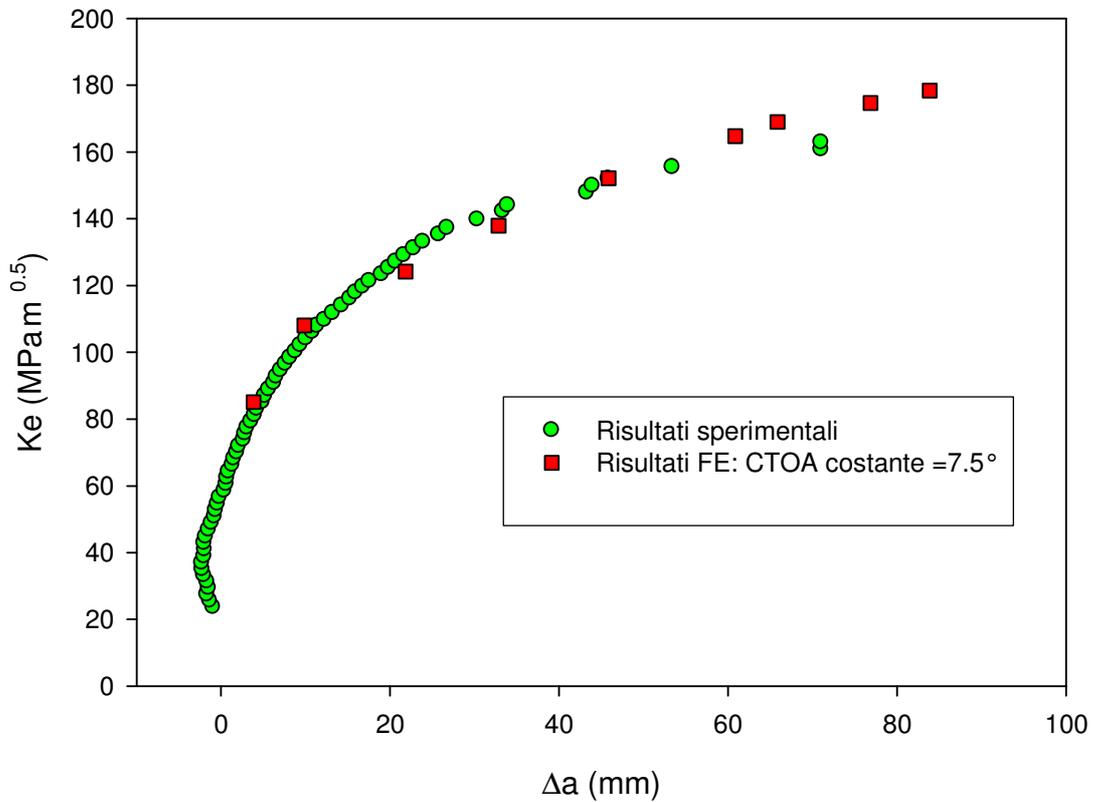


Figura 11. Confronto tra i risultati sperimentali e numerici relativi al provino M(T).

5. CONCLUSIONI

In questo lavoro, il criterio CTOA è stato utilizzato per valutare la possibilità di caratterizzare il comportamento a frattura di un materiale tramite dei semplici test su piccoli provini ed estendere questi risultati a strutture di grandi dimensioni. In particolare sono stati qui descritti i risultati relativi alla lega d'alluminio Al2098 saldata FSW. Il CTOA è stato inizialmente tarato per riprodurre i risultati sperimentali sui provini Kahn, ed il valore costante a regime, dopo i primi millimetri in cui questo mostra un andamento decrescente, è stato applicato per la previsione della curva di resistenza dei provini M(T) ottenendo un buon accordo con i risultati sperimentali. I risultati ottenuti su questo materiale sono ancora più incoraggianti rispetto a quelli ottenuti in un precedente lavoro sulla lega d'alluminio Al6013-T6 in cui la trasferibilità fino a provini M(T) di dimensioni molto grandi si era rivelata problematica richiedendo un CTOA più elevato rispetto a quello tarato sui provini Kahn e sui provini M(T) di piccole dimensioni.

Inoltre anche in questo caso, come nel caso della lega Al6013-T6, il CTOA ha mostrato una prima fase in cui è stato necessario utilizzare un CTOA crescente per un brevissimo tratto di propagazione prima del classico tratto in cui il CTOA è decrescente. Questo tipo di andamento è probabilmente imputabile al fatto che dopo la saldatura le caratteristiche del materiale sono ridotte rispetto al materiale base. Gli sviluppi futuri del presente lavoro prevedono quindi lo studio del CTOA e del problema della trasferibilità con le reali caratteristiche del materiale nelle tre diverse zone del materiale base, della zona di giunzione e della zona termomeccanicamente alterata.

BIBLIOGRAFIA

1. Newman Jr JC, James MA, Erbst U. A review of the CTOA/CTOD fracture criterion. *Engineering Fracture Mechanics*. 2003;70:371-385.
2. Newman Jr JC. An Evaluation of Fracture Analysis Methods. In *Elastic-Plastic Fracture Mechanics Technology*, ASTM STP 896. 1985:5-96.
3. Scheider I, Sch del M, Brocks W, Sch nfeld W. Crack propagation analyses with CTOA and cohesive model: comparison and experimental validation. *Engineering Fracture Mechanics*. 2006;73:252-263.
4. Shih CF, De Lorenzi HG, Andrews WR. Studies on crack initiation and stable crack growth. *ASTM STP 668*. 1979:65-120.
5. Kanninen MF, Rybicki EF, Stonesifer RB, Broek D, Rosenfield AR, Nalin GT. Elastic-plastic fracture mechanics for two dimensional stable crack growth and instability problems. *ASTM STP 668*. 1979:121-150.
6. Brocks W, van H. Numerical studies on stable crack growth. In: *Defect assessment in component fundamentals and Applications*. ESIS publications 9. 1991:19-33.
7. Newman Jr JC. An elastic plastic finite element analysis of crack initiation, stable crack growth and instability. *ASTM STP 833*. 1984:93-117.
8. Mahmoud S, Lease K. The effect of specimen thickness on the experimental characterization of critical crack-tip opening angle in 2024-T351 aluminium alloy. *Engineering Fracture Mechanics*. 2003;70:443-456
9. Dawicke DS, Newman Jr. JC, Bigelow CA. Three-dimensional CTOA and constraint effect during stable tearing in a thin sheet material. *ASTM STP 1256*. 1995:223-242.
10. Newman Jr JC, Crews Jr JH, Bigelow CA, Dawicke DS. Variations of a global constraint factor in cracked bodies under tension and bending loads. *ASTM STP 1244*. 1995:21-42.
11. Schwalbe K-H, Newman Jr JC, Shannon Jr JL. Fracture mechanics testing on specimens with low constraint - standardisation activities within ISO and ASTM. *Engineering Fracture Mechanics*. 2005;72:557-576.
12. Schwalbe K-H. Introduction of σ_5 as an operational definition of the CTOD and its practical use. *ASTM STP 1256*. 1995:763-778.
13. Bron F, Besson J. Simulation of the ductile tearing for two grades of 2024 aluminum alloy thin sheets. *Engineering Fracture Mechanics*. 2006;73:1531-1552.
14. ASTM E561-05. Standard test method for K-R Curve Determination. ASTM, USA.
15. eh JR, Bray GH, Bucci RJ, Macheret . Prediction of R-curves from small coupon tests. In: *FAA/NASA International Symposium on Advanced Structural Integrity Methods for Airframe Durability and Damage Tolerance, Part 2 (SEE N95-19468 05-03)*. NASA Langley Research Center. p. 999-1013.
16. A. Pirondi, D. Fersini "Simulation of Ductile Crack Growth in Thin Panels using CTOA" sottoposto per la pubblicazione su *Engineering Fracture Mechanics*