

**IGF 12 - XII CONVEGNO NAZIONALE  
GRUPPO ITALIANO FRATTURA  
Parma, 12-13 Giugno 1996**

*SUL PROBLEMA DELLA CRITICITÀ ALLA FRATTURA  
DI PANNELLI SOTTILI DI LEGHE D'ALLUMINIO AD  
ALTA RESISTENZA PER IMPIEGHI AERONAUTICI*

*R. Doglione, F. Arena*

Dipartimento di Scienza dei Materiali e Ingegneria Chimica  
Politecnico di Torino  
C.so Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 Torino

**PAROLE CHIAVE:** lega Al-Li 2090 T83 e T62, lamiere sottili, pop-in, curve K-R, COD, plateau della tenacità.

## SOMMARIO

In questo lavoro si è posto il problema della criticità alla frattura di lamiere sottili di lega aeronautica ad alta resistenza Al-Li 2090 negli stati T83 e T62. Le prove di meccanica della frattura hanno dimostrato l'esistenza di importanti fenomeni di pop-in, che portano ad una notevole variabilità nelle curve R all'interno di uno stesso lotto di materiale. Strettamente correlato a questi fenomeni è il fatto che si arrivi sempre ad un cedimento catastrofico finale, anche conducendo le prove in regime di controllo di apertura della cricca (COD). Dall'analisi delle curve R e dall'applicazione di un approccio tipo Feddersen si è quindi cercato di ricavare qualche valore caratterizzante di K, che fosse riproducibile ed affidabilmente applicabile nei calcoli di progetto. Il tentativo di enucleare un soddisfacente parametro critico di frattura è stato coronato da successo, se si focalizza l'analisi sul primo pop-in significativo. Si conclude con una discussione sulla rilevanza ingegneristica dei risultati.

## 1. INTRODUZIONE

Il diffuso impiego in aeronautica di leghe di alluminio ad alta resistenza ha da molto tempo posto il problema della tenacità a frattura di tali materiali, applicati in un'ampia gamma di geometrie e di spessori a seconda dei semilavorati di provenienza, come

forgiati, estrusi e laminati quali profilati, piastre e lamiere sottili. Da alcuni decenni ormai è consuetudine caratterizzare i manufatti di grosso spessore con il valore di tenacità a frattura in deformazione piana  $K_{Ic}$ . Successivamente, per i manufatti sottili come i pannelli, sono stati applicati i concetti tipici delle curve di resistenza alla frattura (curve R) in campo globalmente lineare elastico. La conoscenza di tali curve è oggi ritenuta un requisito indispensabile per le lamiere di leghe del tipo AA 2024-T3 o T8, AA 7075-T6 o AA 7475-T7.

Con l'avvento delle nuove leghe Al-Li, le quali sono state sottoposte alle citate metodologie di caratterizzazione di resistenza alla frattura, l'applicazione delle norme specifiche di meccanica della frattura ha spesso trovato notevoli difficoltà. Si sono infatti manifestati, con molta maggiore intensità rispetto ai materiali tradizionali, fenomeni legati alla peculiare microstruttura di queste leghe, come la tendenza alla delaminazione [1], alla biforcazione delle cricche di fatica e alla loro propagazione su piani inclinati rispetto alla direzione di carico [2], alla crescita instabile ma non catastrofica (pop-in) di cricche sotto carico quasistatico [3]. Spesso questi problemi hanno reso difficile l'individuazione di parametri utilizzabili nella progettazione [3], oppure hanno fatto formulare un giudizio di inaffidabilità delle leghe Al-Li da parte di costruttori di velivoli.

In questo lavoro si affronta quindi il problema della determinazione della tenacità a frattura di lamiere sottili (spessore 1.6 mm) di lega Al-Li 2090 ad alta resistenza, cioè dopo aver subito i trattamenti T6 o T8. A questo proposito, i problemi sopra accennati e la complessità delle procedure sperimentali atte alla determinazione delle curve R hanno in effetti alquanto limitato lo svolgimento di ricerche e la pubblicazione di dati, che si restringono pertanto a pochi lavori apparsi in letteratura [4-12]. Nei citati articoli sono riportati esempi di curve R, ottenute per lamiere o piastre di lega 2090 di vario spessore e sottoposte a differenti trattamenti termici e termomeccanici. Si cerca inoltre di dare un'interpretazione dell'andamento delle curve R in funzione dei dati di microstruttura, chiarendo ad esempio che nelle lamiere spesse il meccanismo di tenacizzazione per delaminazione lungo i bordi ad alto angolo mantiene la tenacità a frattura a valori pari a quelli dei pannelli sottili [4, 5], oppure che gli incrementi di tenacità legati alla deviazione dal modo I o alla ramificazione delle cricche dipendono, soprattutto in condizioni di sottoinvecchiamento, dal fatto che i precipitati coerenti e metastabili concentrano lo scorrimento plastico su poche ed intensissime bande, forzando la cricca a propagare lungo di esse [10, 12]. In altri lavori [8, 9, 11], si sottolinea invece la tendenza alla frattura intergranulare instabile e catastrofica della lega 2090 quando si presenta sotto forma di pannelli sottili ad alta resistenza.

In generale, comunque, tutte le pubblicazioni finora presentate si sono limitate alla determinazione delle curve R della lega 2090 o ad un loro eventuale confronto con quelle delle leghe classiche. Non si è mai invece considerato l'uso delle curva R per predire le condizioni d'instabilità nelle varie configurazioni. Da un punto di vista concettuale non vi sono difficoltà nell'enucleare il punto critico, se questo esiste: è sufficiente applicare i classici concetti energetici formulati da Griffith e Irwin. Al contrario, è invece difficile raggiungere un'affidabile ed univoca soluzione di questo problema quando si verifica il fenomeno del pop-in. Il nodo centrale di questo lavoro è perciò proprio l'individuazione delle condizioni di criticità in presenza di tale evento. L'analisi viene condotta confrontando i risultati ottenuti con i due approcci classici: la costruzione tipo Feddersen e le curve R.

## 2. PARTE SPERIMENTALE

La lega Al-Li 2090 oggetto di questo lavoro è stata fornita dalla Alcoa, sotto forma di lamiere sottili dello spessore di 1.6 mm, nello stato T83. Una parte del materiale è stato poi sottoposto al trattamento termico T62. Nella Tabella 1 sono riportati i dettagli dei trattamenti termici considerati. Dalle lamiere sono stati ricavati provini piatti, prelevati nella direzione di laminazione (L) ed in quella ad essa perpendicolare (LT), per prove di trazione e campioni di tipo M(T) per prove di meccanica della frattura, in accordo con la normativa ASTM E 561-92a. I risultati delle prove di trazione sono riportati in Tabella 2. Com'era prevedibile esiste una certa anisotropia di comportamento fra le caratteristiche meccaniche misurate lungo la direzione di laminazione e quella del trasverso lungo.

Tabella 1: *Dettagli dei trattamenti termici T83 e T62 per la lega 2090 sotto forma di lamiera sottile di spessore 1.6 mm.*

Trattamento	Temperatura di solubilizzazione	Deformazione plastica	Temperatura di invecchiamento	Tempo di invecchiamento
	[°C]	[%]	[°C]	[h]
T83	548	6	160	24
T62	548	-	190	24

I campioni tipo M(T), ricavati dalla lamiera di partenza con piano di frattura orientato nelle direzioni LT e TL, avevano una larghezza  $W \cong 100$  mm, mentre la lunghezza della cricca iniziale, ottenuta per fatica in corrispondenza delle estremità dell'intaglio centrale realizzato meccanicamente, è stata mantenuta sempre nell'intervallo  $0.3 \leq 2a_0/W \leq 0.4$ , secondo quanto raccomandato dalla suddetta norma.

Le prove di meccanica della frattura, finalizzate alla costruzione delle curve R e delle curve di tipo Feddersen, sono state effettuate con l'ausilio di una macchina di trazione servoidraulica MTS da 250 kN e sono state condotte in controllo di apertura della cricca, cioè a velocità d'incremento del COD (misurato nella mezzeria del campione in corrispondenza del piano della cricca) costante. In tal modo si è operato per meglio seguire il fenomeno - frequente in questo tipo di leghe - dei pop-in che, altrimenti, in condizioni di prova di controllo di carico, avrebbero portato prematuramente a rottura i campioni. La propagazione fisica della cricca è stata seguita effettuando scarichi parziali durante le prove e misurando poi la relativa cedevolezza del provino [13], mentre l'incremento efficace della cricca è stato valutato con il metodo delle secanti prescritto dalla norma di cui sopra.

Non sono stati utilizzati poi dispositivi anti-ingobbamento per evitare eccessive ed inutili complicazioni nell'apparecchiatura di prova e soprattutto per meglio riprodurre le condizioni di carico reali cui questi pannelli sottili, nel loro impiego tradizionale, sono effettivamente soggetti.

Sono state infine condotte analisi metallografiche su campioni provenienti da entrambi i lotti di materiale, allo scopo di confrontare forma e dimensioni dei grani, e analisi frattografiche tramite microscopio elettronico a scansione, per confrontare i meccanismi di frattura di campioni di diversa orientazione e diverso stato di trattamento.

### 3. RISULTATI

L'analisi metallografica ha rivelato per la lega in entrambi gli stati di trattamento una fine struttura interamente ricristallizzata. La T62 è caratterizzata da grani all'incirca equiassiali (*aspect ratio*  $\cong 1$ ) di diametro medio di  $5\div 10\mu\text{m}$ , mentre la T83 ha presentato grani leggermente assottigliati ed allungati nella direzione di laminazione (*aspect ratio* pari a  $1\div 1.5$ ) come conseguenza della deformazione intermedia, con diametro medio ancora di  $5\div 10\mu\text{m}$ , misurato nella direzione del trasverso lungo. Si è riscontrato infine un forte allineamento dei composti intermetallici, essenzialmente a base di Al, Cu, Li e Fe, lungo i bordi dei grani nella direzione di laminazione. In definitiva, si può concludere che la microstruttura dei due lotti di materiale sia perciò abbastanza simile.

Per quanto riguarda le caratteristiche tensili, si nota soprattutto la naturale maggior resistenza del materiale T83, che è da correlarsi con l'aumento della densità di nucleazione e quindi della percentuale in volume delle particelle rafforzanti  $T_1$  sulle dislocazioni create dalla deformazione plastica imposta fra tempra e invecchiamento [14].

Tabella 2: Caratteristiche meccaniche della lega nei due diversi stati lungo le direzioni di prelievo L ed LT.

	E [MPa]	$\sigma_{ys}$ [MPa]	$\sigma_{Ts}$ [MPa]	e [%]	n
2090-T83 L	77700	530	559	7	0.030
2090-T83 LT	78500	506	537	10	0.031
2090-T62 L	78300	467	522	4	0.059
2090-T62 LT	78000	416	477	7	0.061

I diagrammi carico-spostamento dell'apertura della cricca (P-COD) ottenuti dalle prove di meccanica della frattura manifestano, per entrambi i trattamenti termici e le direzioni di prelievo, la presenza di pop-in in numero ed entità variabile da campione a campione. Il comportamento a frattura del materiale è dunque stabile solo all'inizio della propagazione della cricca: con l'insorgere dei pop-in intervengono fenomeni localizzati di avanzamento instabile del difetto. Nonostante le prove siano state condotte in controllo di COD, tutti i campioni hanno presto o tardi dato luogo a frattura instabile e catastrofica. Oltre a ciò, il punto di rottura finale sul diagramma P-COD varia da caso a caso, situandosi quasi sempre ben prima del raggiungimento del carico massimo. Con i dati raccolti si è proceduto poi alla costruzione delle curve R, alcuni esempi delle quali sono riportati nelle Figure 1 e 2: il loro aspetto, contenendo esse insiememente punti separati da propagazioni instabili durante i pop-in, tradisce la variabilità dei diagrammi P-COD dai quali sono state dedotte. La maggior parte degli esemplari di curve R tende ad appiattirsi ad alto livello di carico, raggiungendo approssimativamente la saturazione della tenacità in corrispondenza di una specie di plateau superiore. Tale stato non viene mantenuto a lungo dai campioni, poichè dopo alcuni pop-in avviene la frattura catastrofica. In alcuni altri campioni, rappresentativi soprattutto della direzione TL nello stato T62, il plateau superiore di tenacità o non viene raggiunto, con cedimento prematuro, oppure appena raggiunto si verifica l'instabilità finale. La variabilità di comportamento sopra accennata rende evidentemente impossibile enucleare in modo semplice un qualche parametro critico che possa essere utilizzato nella progettazione, a meno di accettare pesanti margini di conservatività.

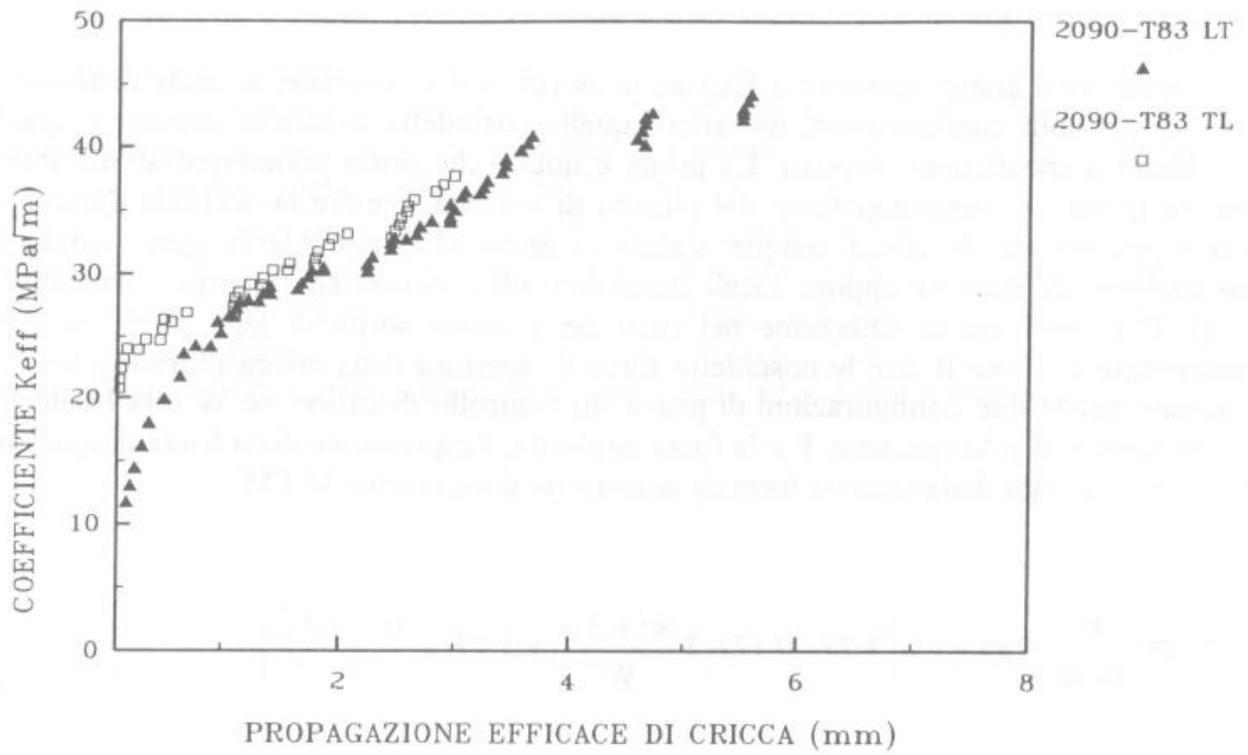


Figura 1: Curve K-R per la lega 2090-T83 nelle direzioni di prelievo TL ed LT.

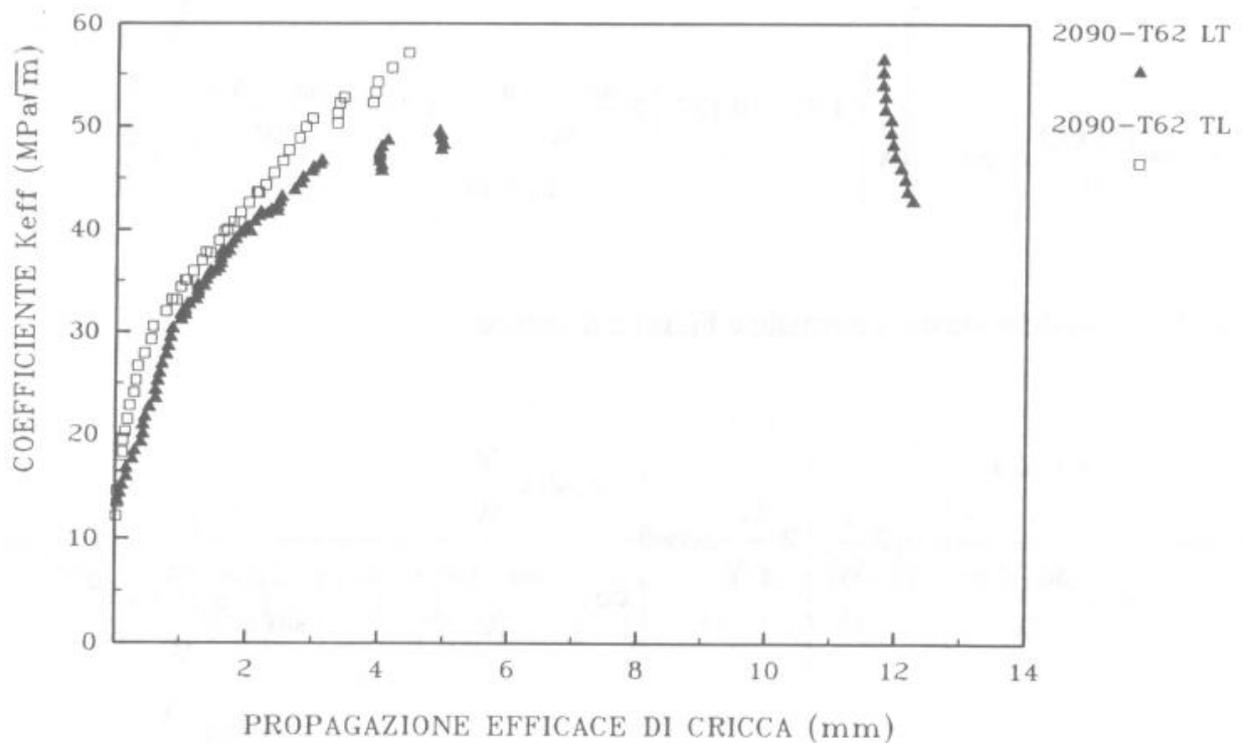


Figura 2: Curve K-R per la lega 2090-T62 nelle direzioni di prelievo TL ed LT.

#### 4. DISCUSSIONE

Per prevedere il comportamento a frattura in esercizio del materiale, si suole distinguere fra due possibili configurazioni di carico: quella cosiddetta a carichi imposti e quella cosiddetta a spostamenti imposti. La prima è quella che porta comunque all'instabilità sempre prima del raggiungimento del plateau di tenacità, mentre la seconda garantisce una propagazione di cricca sempre stabile, a meno che non intervengano cambi di meccanismo di frattura oppure locali instabilità alla lacerazione ("tearing instability", [11]). Per verificare la situazione nel caso dei pannelli sottili di lega 2090, si sono confrontate le curve R con le cosiddette forze di apertura della cricca ("driving force") calcolate per le due configurazioni di prova. In controllo di carico, se W è la larghezza del campione, B è lo spessore, P è la forza applicata, l'espressione della forza di apertura della cricca è data dalla classica formula consigliata dalla norma ASTM:

$$K(\Delta a) = \left( \frac{P}{W \cdot B} \right) \cdot \sqrt{a_0 + \Delta a} \cdot \left[ 1.77 - 0.177 \cdot \left( 2 \cdot \frac{a_0 + \Delta a}{W} \right) + 1.77 \cdot \left( 2 \cdot \frac{a_0 + \Delta a}{W} \right)^2 \right] \quad (1)$$

che descrive una curva crescente con concavità verso l'alto nel piano K- $\Delta a$ . Tale equazione è di carattere generale: eliminando il carico ed esplicitando il fattore d'intensità delle tensioni rispetto al COD, si ottiene un'espressione che descrive la forza di estensione del difetto in controllo di apertura della cricca (controllo di COD). Sostituendo infatti nell'equazione (1) la relazione che lega la cedevolezza al COD, cioè la formula di Eftis e Liebowitz, si ottiene:

$$K(\Delta a) = \frac{E \cdot \text{COD}}{W} \cdot \sqrt{a_0 + \Delta a} \cdot \left[ \frac{1.77 - 0.177 \cdot \left( 2 \cdot \frac{a_0 + \Delta a}{W} \right) + 1.77 \cdot \left( 2 \cdot \frac{a_0 + \Delta a}{W} \right)^2}{F(\Delta a)} \right] \quad (2)$$

dove E è il modulo elastico normale e F( $\Delta a$ ) è il fattore:

$$F(\Delta a) = \left[ \frac{\pi \cdot \left( \frac{a_0 + \Delta a}{W} \right)}{\sin \left( \pi \cdot \frac{a_0 + \Delta a}{W} \right)} \right]^{0.5} \cdot \left( 2 \cdot \frac{Y}{W} \right) \cdot \left[ 2 \cdot \frac{W}{\pi \cdot Y} \cdot \text{acosh} \left( \frac{\cosh \left( \pi \cdot \frac{Y}{W} \right)}{\cos \left( \pi \cdot \frac{a_0 + \Delta a}{W} \right)} \right) - \frac{1 + \mu}{1 + \left[ \frac{\sin \left( \pi \cdot \frac{a_0 + \Delta a}{W} \right)}{\sinh \left( \pi \cdot \frac{Y}{W} \right)} \right]^2} \right]^{0.5} + \mu$$

essendo  $\mu$  il coefficiente di Poisson ed Y la semidistanza fra i punti di misura del COD.

In questo caso la forza di estensione della cricca assume andamento decrescente sul piano  $K-\Delta a$ . Le equazioni (1) e (2) sono state riportate sui diagrammi contenenti le curve R: in Figura 3 ne è riportato un caso tipico. Si nota come, nonostante le due curve della forza di estensione della cricca non siano equivalenti, in entrambi i casi sia possibile conseguire l'arresto della propagazione della cricca in seguito al pop-in. Ciò è dovuto all'elevata pendenza della curva R prima del raggiungimento del plateau. Arrivati a quest'ultimo, né il controllo di carico, né il controllo di COD sono in grado d'impedire la frattura catastrofica. Tale fenomeno è stato recentemente spiegato [9, 11] con un cambio di morfologia di frattura a causa del progressivo accelerare della propagazione di cricca, con il passaggio da una frattura intergranulare duttile ad una intergranulare fragile.

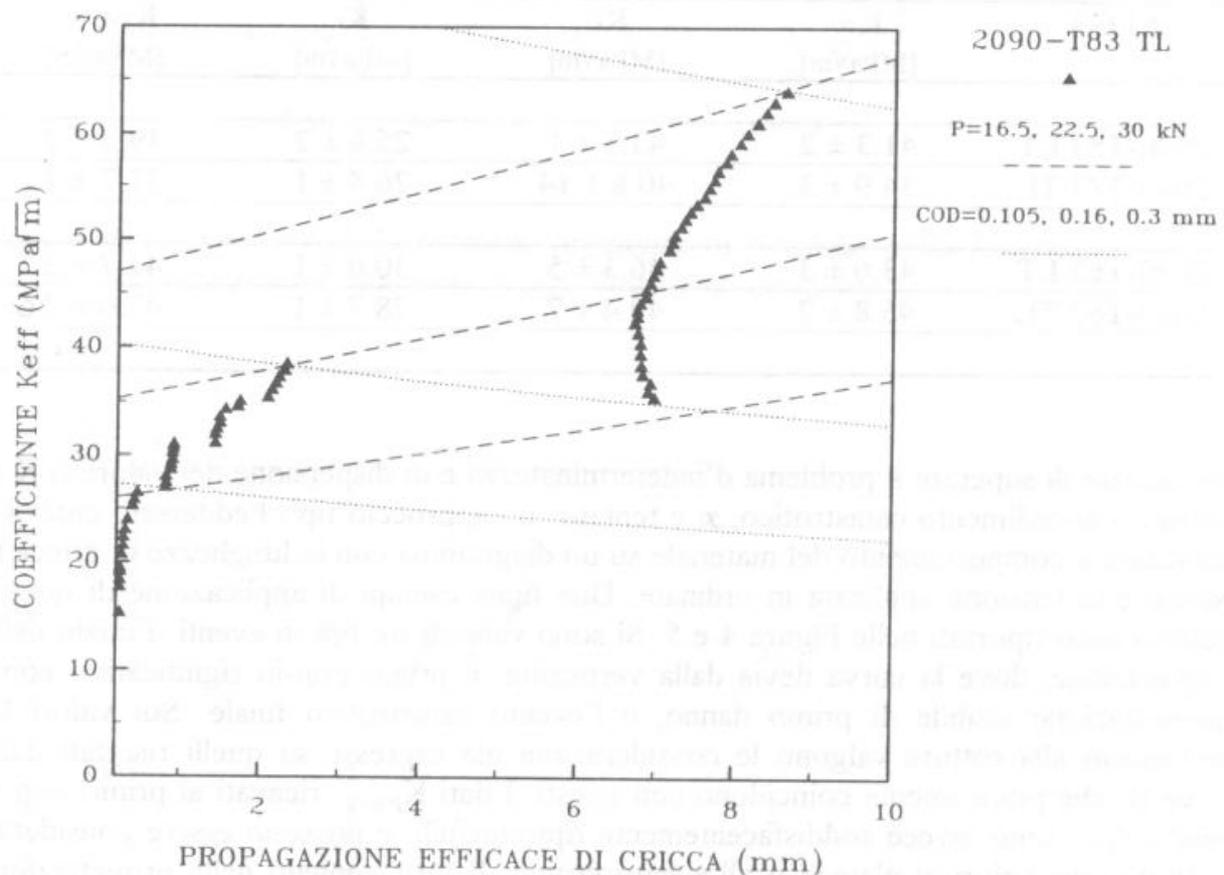


Figura 3: Curve rappresentative delle forze di estensione della cricca, per le due tipiche configurazioni di prova (controllo di carico e controllo di COD), sovrapposte ad una curva R per la lega 2090-T83, direzione TL.

Tenuto quindi conto della forma e della variabilità delle curve R e della discussa fenomenologia che porta alla frattura catastrofica, si sono enucleati come parametri critici di frattura caratterizzanti il materiale i valori di K al plateau ( $K_{\infty}$ ) e all'instabilità

finale ( $K_c$ ). I valori sono riportati in Tabella 3. In concordanza con quanto prima discusso, i valori  $K_c$  all'instabilità soffrono di elevata dispersione: ciò dipende dal verificarsi o meno di un grande pop-in prima del tratto finale della curva R. Poichè tale evento ha natura casuale e quindi non prevedibile a priori, l'assunzione del valore di  $K_c$  nei calcoli di progetto porta a non conservatività, in quanto sovrastima la tenacità a frattura nei casi in cui esso non si manifesti. All'inconveniente riportato si rimedia in parte stimando i valori  $K_\infty$ , rappresentativi del plateau della tenacità. La dispersione diminuisce ma non in maniera totalmente soddisfacente, a causa della difficoltà di raggiungimento del plateau in alcuni campioni.

*Tabella 3: Parametri di frattura calcolati con le lunghezze fisiche di cricca per la lega 2090-T83 e T62.  $K_\infty$  è il valore calcolato in corrispondenza del plateau,  $K_c$  è calcolato al punto d'instabilità,  $K_i$  è determinato all'innescò e  $K_{pop-in}$  è letto in corrispondenza del primo pop-in.*

LEGA	$K_\infty$ [MPa√m]	$K_c$ [MPa√m]	$K_i$ [MPa√m]	$K_{pop-in}$ [MPa√m]
2090-T83 LT	41.3 ± 2	43.5 ± 1	25.8 ± 2	39.3 ± 2
2090-T83 TL	34.9 ± 3	40.8 ± 14	26.4 ± 1	32.7 ± 3
2090-T62 LT	43.6 ± 3	46.3 ± 5	30.0 ± 1	41.7 ± 2
2090-T62 TL	45.8 ± 7	49.4 ± 7	28.7 ± 1	47.6 ± 2

Per cercare di superare il problema d'indeterminatezza e di dispersione dei valori di  $K$  al plateau o al cedimento catastrofico, si è tentato un approccio tipo Feddersen, cioè si è analizzato il comportamento del materiale su un diagramma con le lunghezze di cricca in ascisse e la tensione applicata in ordinate. Due tipici esempi di applicazione di questo metodo sono riportati nelle Figure 4 e 5. Si sono valutati tre tipi di eventi: l'inizio della propagazione, dove la curva devia dalla verticalità, il primo pop-in significativo come manifestazione visibile di primo danno, e l'evento catastrofico finale. Sui valori  $K_c$  determinati alla rottura valgono le considerazioni già espresse su quelli risultati dalle curve R, che praticamente coincidono con questi. I dati  $K_{pop-in}$  ricavati al primo pop-in significativo sono invece soddisfacentemente riproducibili, e possono essere considerati sostitutivi dei valori al plateau o all'evento critico. Il loro impiego nella progettazione risulta plausibile poichè approssimano abbastanza bene i livelli massimi di tenacità del materiale e contengono un ragionevole margine di conservatività. Infine, i valori all'innescò  $K_i$  sono risultati i più riproducibili dell'intera serie, e possono essere senz'altro utilizzati, con maggior tranquillità di progetto, nel caso di strutture che richiedano più elevati coefficienti di sicurezza.

In definitiva, pur in presenza di curve R caratterizzate da forti discontinuità e da una certa variabilità di forma, è possibile enucleare soddisfacenti valori ingegneristici di  $K$  al primo pop-in significativo, in quanto tale evento è ben riproducibile e si colloca sufficientemente vicino al plateau della tenacità da garantire margini di conservatività ragionevoli.

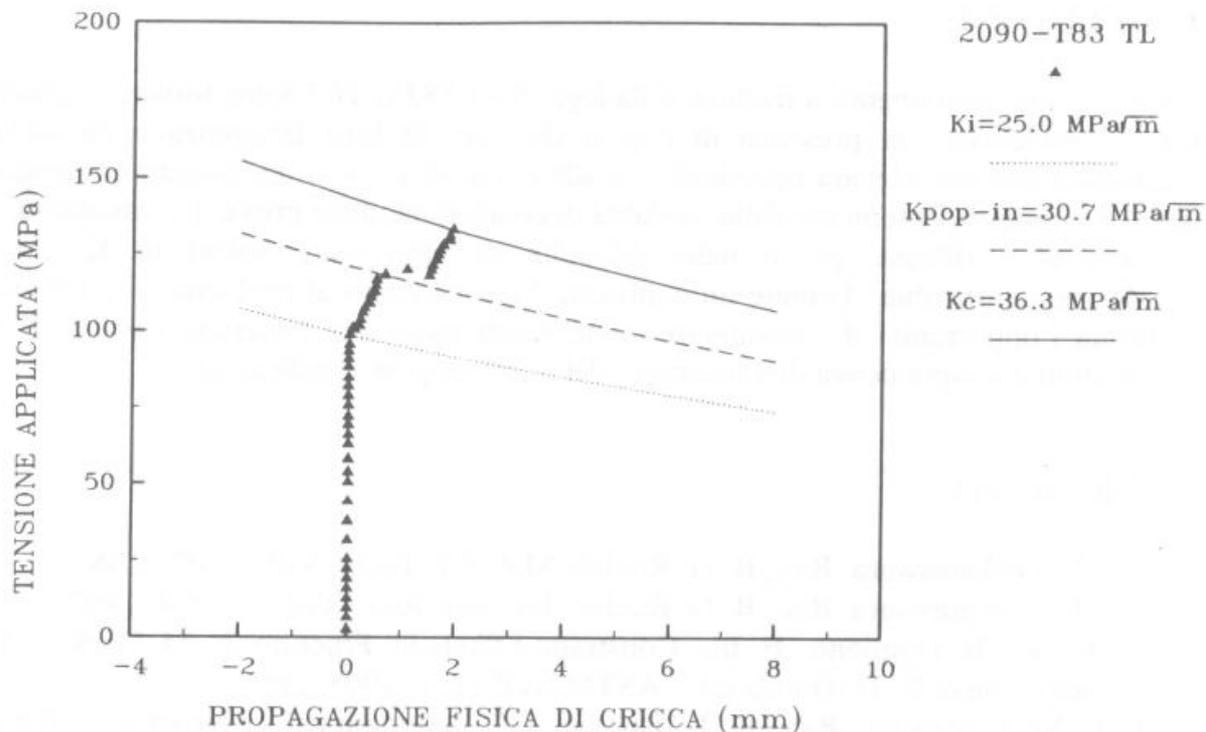


Figura 4: Andamento della tensione applicata in funzione della lunghezza fisica di cricca per un campione di lega 2090-T83, direzione TL.

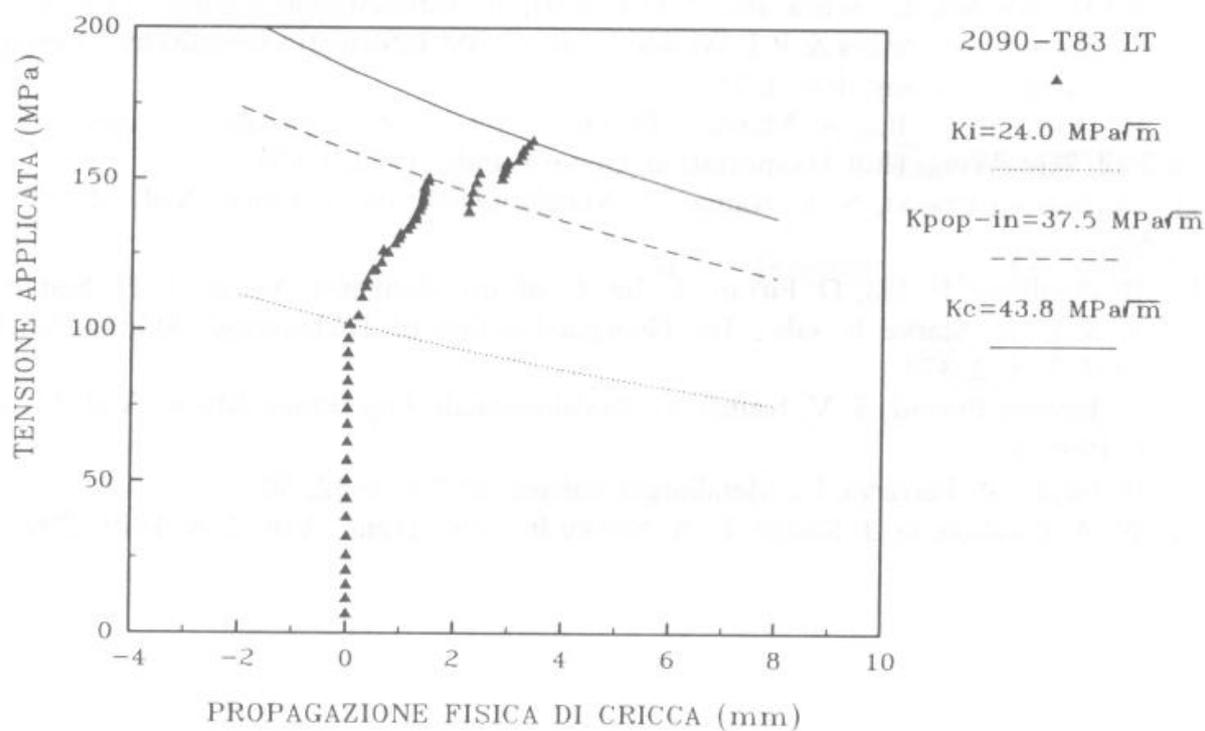


Figura 5: Andamento della tensione applicata in funzione della lunghezza fisica di cricca per un campione di lega 2090-T83, direzione LT.

## 5. CONCLUSIONI

L'esame del comportamento a frattura della lega 2090 T83 o T62 sotto forma di lamiere sottili ha evidenziato la presenza di pop-in che, per la loro frequenza e casualità, conferiscono una non elevata riproducibilità alle curve R, e da un cedimento comunque catastrofico indipendentemente dalle modalità di conduzione delle prove. La variabilità di tali curve si è riflessa quindi nella difficoltà di individuare valori di K critici particolarmente affidabili. Tramite un approccio ingegneristico al problema si è tuttavia evidenziata l'opportunità di considerare come caratteristici del materiale i valori di K determinati in corrispondenza dell'insorgere del primo pop-in significativo.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] K. T. Venkateswara Rao, R. O. Ritchie, *Mat. Sci. Tech.*, Vol. 5, 1989, 882.
- [2] K. T. Venkateswara Rao, R. O. Ritchie, *Int. Mat. Rev.*, Vol. 37, n° 4, 1992, 153.
- [3] D. Firrao, R. Doglione, E. Ilia, *Constraint Effects in Fracture*, E. M. Hackett, K. H. Schwalbe & R. H. Dodds eds., ASTM STP 1171, 1993, 289.
- [4] K.T. Venkateswara Rao, R.O. Ritchie, 5<sup>th</sup> International Aluminium-Lithium Conference, T.H. Sanders Jr. & E.A. Starke Jr. eds. (Materials and Component Engineering Publications Ltd., Birmingham, UK, 1989), 1501.
- [5] K. T. Venkateswara Rao, R. O. Ritchie, *Scripta Met.*, Vol. 23, 1989, 1129.
- [6] G. Cavallini et al., *New Light Alloys (AGARD n° 444)*, Neuilly sur Seine, France, 1989), 11-1.
- [7] R. Doglione, E. Ilia, D. Firrao, *Proc. VII Convegno Nazionale Gruppo Italiano Frattura*, S. Reale ed. (Firenze, Italy, 1991), 57.
- [8] R.J.H. Wanhill, L. Schra and W.G.J. Hart, 6<sup>th</sup> International Aluminium-Lithium Conference, M. Peters & P.J. Winklers eds. (DGM Informationgesellschaft Verlag, Oberursel, Germany, 1992), 253.
- [9] R. Doglione, E. Ilia, A. Marcelli, D. Firrao, *Int. Conf. Materials Development in Rail, Tire, Wing, Hull Transportation*, Genova, Italy, 1992, 1.191.
- [10] N. Eswara Prasad, S. V. Kamat, G. Malakondaiah, *Int. J. Fract.*, Vol. 61, 1993, 55.
- [11] R. Doglione, E. Ilia, D. Firrao, 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Aluminum Alloys, T. H. Sanders Jr. & E. A. Starke Jr. eds., The Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 1994, Vol. 2, 374.
- [12] N. Eswara Prasad, S. V. Kamat, G. Malakondaiah, *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 51, n° 1, 1995, 87.
- [13] D. Firrao, R. Ferrario, *La Metallurgia Italiana*, n° 7/8, 1982, 505.
- [14] W. A. Cassada, G. J. Shiflet, E. A. Starke Jr., *Met. Trans.*, Vol. 22A, 1991, 299.