

TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO DE ALTA RESISTÊNCIA SAE AMS 7475-T7351 ¹

Francisco de Assis Toti⁽²⁾
José Ricardo Tarpani^{(3)*}
Dirceu Spinelli⁽³⁾

Resumo

A ampla utilização das ligas de alumínio em aplicações estruturais na indústria aeronáutica deve-se basicamente à sua boa resistência aos esforços de fadiga e às suas elevadas propriedades mecânicas de resistência à tração e módulo de elasticidade, reconhecidas e comprovadas. No entanto, poucos trabalhos têm sido dedicados ao desempenho destas mesmas ligas sob carregamento de impacto, especialmente na presença de defeitos do tipo-trincas. No presente artigo, a tenacidade à fratura dinâmica elasto-plástica, J_{Id} , de uma placa forjada de uma liga de alumínio SAE AMS 7475-T7351, é determinada para as orientações T-L, T-S, L-T e L-S. Para isso, a energia absorvida no processo de fratura dinâmica, tal como obtida a partir de ensaios de impacto Charpy instrumentado conduzidos à temperatura ambiente, foi aplicada à expressões matemáticas propostas na literatura. Os resultados de J_{Id} calculados segundo o critério de iniciação de trincamento do corpo de prova foram essencialmente validados de acordo com os requisitos estabelecidos na norma ASTM-E1820. No entanto, os valores de J_{Id} calculados com base na carga máxima suportada pelo espécime foram validados apenas para as orientações T-L e T-S.

Palavras-chave: Ensaio de impacto Charpy; Ligas de alumínio de alta resistência; Tenacidade à fratura dinâmica.

¹ Artigo apresentado no 60º CONGRESSO ANUAL DA ABM BRASIL, Julho de 2005, Belo Horizonte - MG, Brasil

² MSc. em Ciência e Engenharia de Materiais

³ Professor, *jrpan@sc.usp.br

Os autores atuam no Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SMM-EESC-USP), Brasil

1 INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio de alta resistência são materiais tradicionalmente utilizados na construção de aeronaves, sejam elas de pequeno, médio ou grande porte. Além de uma boa resistência aos esforços de fadiga, estes materiais exibem ótimas relações resistência mecânica/densidade e rigidez/densidade (ie, propriedades específicas), quando comparadas às ligas ferrosas, o que constitui uma condição primordial para a eficiência em vôo da aeronave. Entretanto, um requisito não menos importante para os materiais estruturais utilizados na indústria aeronáutica é a sua resistência ao impacto, em especial na existência prévia de um defeito do tipo-trinca. Ligas de alumínio são utilizadas na fabricação de vários componentes estruturais, inclusive trens de pouso, estando portanto inerentemente submetidas a cargas de impacto durante pousos e decolagens das aeronaves [1]. Mudanças mais bruscas no nível de tensão ou deformação à frente de um defeito tipo-trinca previamente existente no material, como decorrência, por exemplo, de um choque mais violento do trem de pouso com o solo durante um pouso forçado da aeronave, podem eventualmente induzir a fratura dinâmica do componente [2,3]. Pela utilização dos conceitos da Mecânica da Fratura, é possível a determinação ou a inferência do grau de segurança que um componente ou estrutura desta natureza, operando em serviço, possui relativamente à este tipo de falha por fratura catastrófica. O parâmetro da Mecânica da Fratura Elásto-Plástica (MFEP) que estima a capacidade do material resistir à fratura rápida sob condições de relativa plasticidade à frente da trinca, é denominado tenacidade à fratura dinâmica, J_{Id} , e tem suas bases fundadas no conceito da integral-J. A consulta das principais fontes da literatura científica aberta, mostra a quase inexistência de trabalhos devotados à tenacidade à fratura dinâmica de ligas de alumínio de grau aeronáutico [2,4,5]. O presente estudo objetiva, portanto, contribuir para um melhor entendimento do comportamento mecânico desta importante classe de materiais sob esforços dinâmicos, na presença de trincas. Cabe ressaltar que, em virtude da escassez bibliográfica no tema em questão, especificamente voltada às ligas leves de alumínio, procedimentos experimentais e analíticos aplicados tipicamente a ligas ferrosas estruturais foram utilizados na tarefa de avaliação do desempenho das primeiras sob impacto Charpy.

2 MATERIAL E CORPOS DE PROVA

O material investigado foi uma liga de alumínio de alta resistência SAE AMS 7475, tratada para a condição T7351 [6], fornecido na forma de placa forjada com espessura de 60 mm. As propriedades mecânicas da liga são apresentadas na Tabela 1. A microestrutura exibida pela liga ensaiada é mostrada na Figura 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas quase-estáticas do material ensaiado à temperatura ambiente, em duas orientações principais [7].

Direção	Módulo de Elasticidade (GPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Redução de Área (%)	Alongamento (%) $L_0=25$ mm
Transversal	73	398	472	15	11
Longitudinal	71	395	470	19	17

Corpos de prova Charpy tipo-A, com dimensões $10 \times 10 \times 55$ mm³, foram extraídos da placa base segundo as orientações T-L, T-S, L-T e L-S [8]. Um entalhe central, com

profundidade de 1 mm, foi introduzido nos espécimes por intermédio de eletroerosão, utilizando-se na tarefa um filamento de diâmetro 0,2 mm. Em seguida os corpos de prova foram pré-trincados sob fadiga, em um sistema de ensaios da MTS^R, até uma profundidade total de trinca de 2 mm ($a/W = 0,2$) [9]. Utilizou-se no pré-trincamento uma razão de carga $R = 0,1$, um fator de intensidade de tensões elásticas máximo ($K_{máx}$) de $12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, aplicado sob uma frequência de 50 Hz.

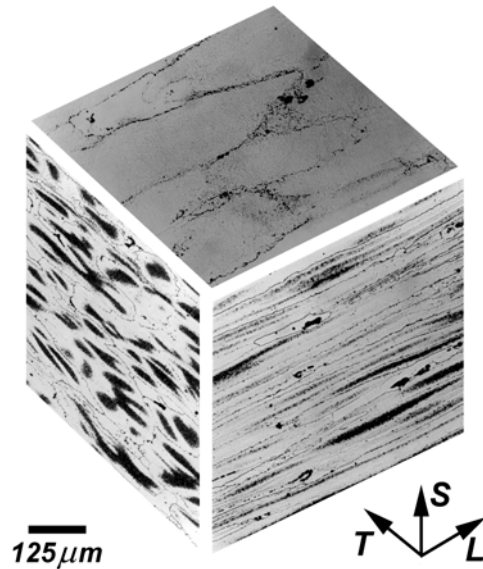


Figura 1. Microestrutura texturizada da liga de alumínio 7475-T7351.

3 MÉTODOS

3.1 Ensaio de Impacto Charpy Instrumentado

Os ensaios de impacto Charpy foram realizados à temperatura ambiente, em um sistema Instron-Wolpert^R PW30 instrumentado e informatizado, que fornece as curvas carga(P)-tempo(t)-deslocamento(s)-energia absorvida (E) no impacto. A Figura 2 mostra um exemplo de curva P - t - E obtida em um destes ensaios.

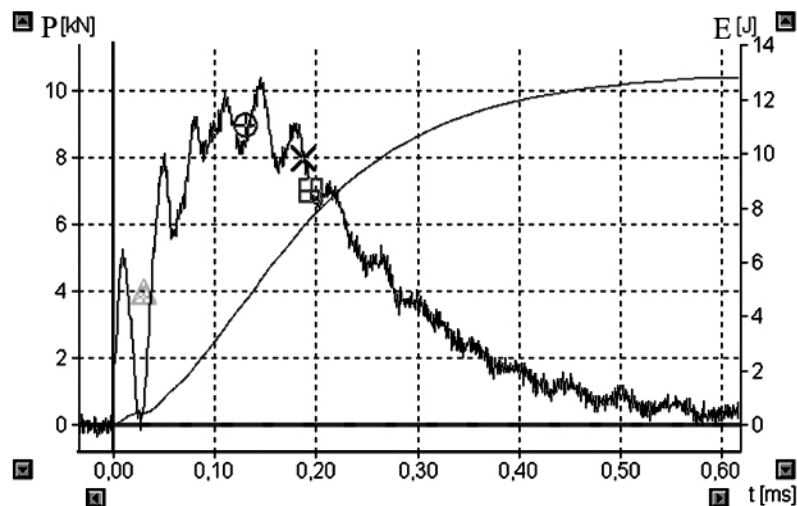


Figura 2. Curva típica de carga-tempo-energia registrada durante o ensaio de impacto instrumentado Charpy de um corpos de prova na orientação L-T.

Foram ensaiados três corpos de prova para cada uma das quatro orientações de corpos de prova, a uma velocidade de impacto do martelo de 5,52 m/s. Na velocidade do martelo de 2,25 m/s, foi ensaiado apenas um corpo de prova para cada orientação T-L, T-S e L-T, visto que a energia de fundo de escala do martelo não era suficiente, nesta velocidade de impacto, para a fratura completa do espécime com orientação L-S. Esta última foi, portanto, submetida adicionalmente às velocidades de carregamento de 3,2 m/s e 4,0 m/s, respectivamente. Em geral, as curvas P-s e P-t originais, geradas no ensaio Charpy, apresentam oscilações (vide Figura 2), especialmente até o ponto de carga máxima, que foram posteriormente eliminadas ou minimizadas utilizando-se, para isso, o método da média móvel [5,10].

3.2 Determinação do Ponto de Iniciação do Trincamento

Kobayashi et al [5,10-12], trabalhando com ligas leves de alumínio e titânio e aço de grau nuclear no regime elasto-plástico, desenvolveram o método da taxa de variação da flexibilidade elástica do corpo de prova para a determinação do ponto de iniciação de trincamento dúctil sob impacto Charpy, tendo em vista as inerentes dificuldades de se monitorarem os eventos de início e crescimento de trincas sob relativamente elevadas taxas de carregamento. A expressão básica que fundamenta o método é dada por:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{C - C_{el}}{C_{el}} \quad (1)$$

onde: $\Delta C/C$ = taxa de mudança da flexibilidade elástica do corpo de prova (cdp)

C = secante da flexibilidade (mm/N)

C_{el} = flexibilidade elástica (mm/N)

Experimentalmente, o método consiste em se registrar a carga e o deslocamento, ou deflexão, aplicados ao espécime e determinar o ponto em que ocorre uma súbita alteração da taxa de variação da flexibilidade do corpo de prova, que presumivelmente indica o ponto onde se inicia a propagação da trinca. O princípio que rege esta metodologia é estabelecido com base nas seguintes etapas de deformação do corpo de prova, ilustradas detalhadamente na Figura 3:

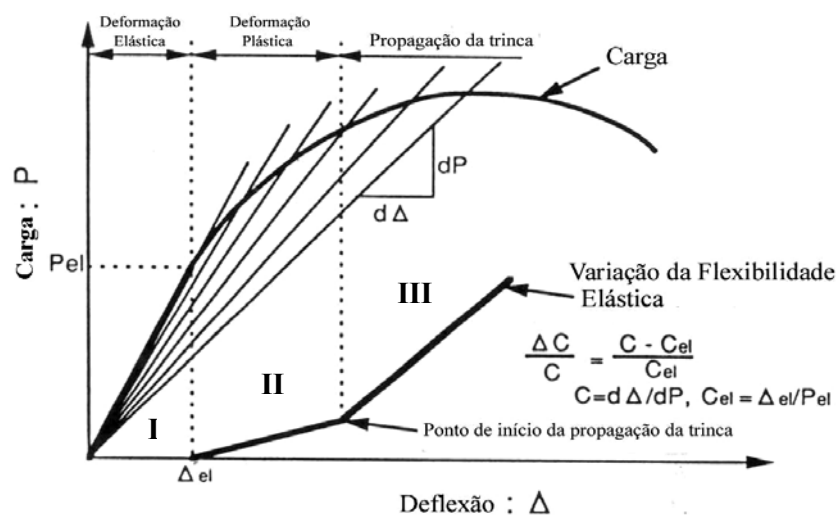


Figura 3. Método da taxa de variação da flexibilidade elástica [5,10-12].

- I. Estágio de deformação elástica: onde a flexibilidade elástica é praticamente constante, e a taxa de variação é nula, ou seja, $\Delta C/C = 0$;
- II. Estágio de deformação plástica: quando $\Delta C/C$ aumenta de modo constante, e a sua taxa de crescimento depende do expoente de encruamento do material;
- III. Iniciado o crescimento da trinca, há um aumento brusco na taxa de variação da flexibilidade $\Delta C/C$, quando se observa uma diminuição da área resistente do corpo de prova.

3.3 Cálculo da Tenacidade à Fratura Dinâmica, J_{Id}

Kobayashi et al [5,10-12] e Angamuthu et al. [13] utilizaram a expressão originalmente elaborada por Rice [14] para a determinação da tenacidade à fratura quase-estática (J_{Ic}). Com isso, pode-se estimar, sob condições de carregamento dinâmico, o valor J_{Id} , tendo-se como referência o ponto de iniciação do trincamento determinado conforme o item 3.2. A expressão de J_{Id} proposta pelos pesquisadores, e retificada por Tronskar [15] e Jian [16], é como segue:

$$J_{Id} = 1,46 E_i / B (W - a) \quad (2)$$

onde: E_i = termo de absorção de energia de impacto no início do trincamento;

B = a espessura do corpo de prova;

W = é a largura do corpo de prova;

a = comprimento da pré-trinca;

$W - a = b$ = ligamento original do corpo de prova.

3.4 Validação dos Valores J_{Id}

Para se determinar a validade dos resultados de tenacidade à fratura dinâmica elasto-plástica, J_{Id} , de forma a que esta possa ser considerada uma propriedade intrínseca do material, Kobayashi et al [5,10-12] e Angamuthu et al [13] propuseram as seguintes expressões, de acordo com a norma ASTM-E1820 [17]:

$$a, B, W, b \geq 25 (J_{Id} / \sigma_{yd}) \quad (3)$$

$$\sigma_{yd} = 2,85 P_y W / (B.b^2) \quad (4)$$

onde: σ_{yd} é o limite de escoamento dinâmico [18], e P_y é a carga de escoamento.

3.5 Tenacidade à Fratura na Carga Máxima

Zhang & Shi [19], trabalhando com aço de grau nuclear, posteriormente propuseram a simplificação do cálculo de J_{Id} , assumindo que a trinca inicia seu crescimento na carga máxima suportada pelo espécime ensaiado. Segundo estes autores, o ganho de tempo, a facilidade do procedimento, o uso de equipamentos mais modestos, sem a necessidade de se recorrer à informatização de métodos e processos, justificariam os pequenos erros na estimativa de J_{Id} , decorrentes desta abordagem.

No presente trabalho, todos os procedimentos analíticos e matemáticos acima descritos constituíram um programa computacional especificamente elaborado, utilizando-se ferramentas de Matlab, que possibilitaram o rápido polimento das curvas originais P-s, e a imediata geração e validação (ou não) dos resultados de J_{Id} , segundo as duas abordagens em questão, a saber, de iniciação de trincamento e de carga máxima.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Tenacidade à Fratura Dinâmica Elasto-Plástica, J_{Id}

Os valores de J_{Id} , para as quatro orientações avaliadas, foram obtidos via Exp.(2), considerando-se a energia de início de propagação de trinca, E_i , determinada pelo método da variação da flexibilidade do cdp. Posteriormente, através da mesma expressão, considerou-se a energia absorvida até o ponto de carga máxima, E_{cm} . A Figura 4 mostra os valores de J_{Id} obtidos via E_i , para a velocidade de carregamento de 5,52 m/s, onde observa-se a proximidade entre os resultados relativos às orientações T-L, T-S e L-T. Eles são, porém, substancialmente inferiores ao da orientação L-S, a mais tenaz das orientações. A redução da velocidade de carregamento, de 5,52 para 2,25 m/s, reduziu J_{Id} drasticamente nas orientações T-L, T-S e L-T. O mesmo ocorreu para a orientação L-S, quando da redução da velocidade de impacto, de 5,52 m/s para 4,0 m/s, e, posteriormente, para 3,2 m/s.

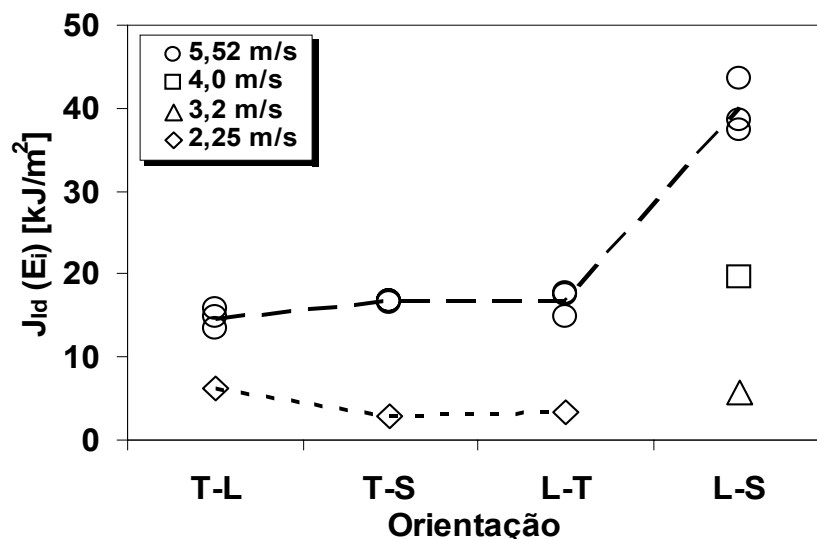


Figura 4. Valores de tenacidade à fratura dinâmica, J_{Id} , obtidos via energia de início de propagação da trinca, E_i , em função da variação da velocidade de carregamento.

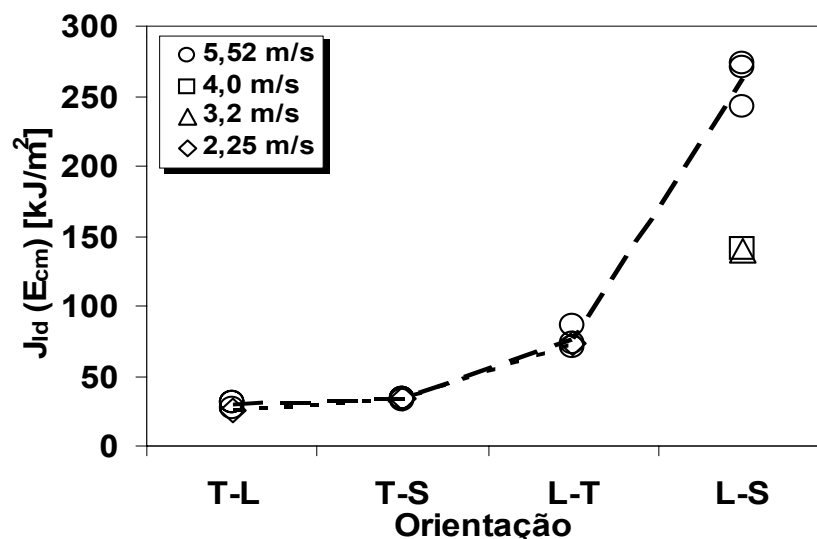


Figura 5. Valores de tenacidade à fratura dinâmica, J_{Id} , obtidos por meio da energia de carga máxima, E_{cm} , em função da variação da velocidade de carregamento.

A Figura 5 mostra que os valores de J_{Id} obtidos através da energia de carga máxima, E_{cm} , para a velocidade de carregamento de 5,52 m/s, exibem a mesma tendência de crescimento segundo a seqüência de orientações de corpos de prova, T-L < T-S < L-T < L-S, igualmente ao verificado para $J_{Id}(E_i)$. No entanto, diferentemente do observado anteriormente com este último parâmetro, a redução da velocidade de carregamento de 5,52 m/s para 2,25 m/s não leva a uma redução significativa dos valores de $J_{Id}(E_{cm})$ nas orientações T-L, T-S e L-T. Já na orientação L-S, que se revelou como a mais tenaz das quatro presentemente avaliadas, o valor de J_{Id} decresceu com a redução da velocidade de carregamento de 5,52 m/s para 4,0 m/s, mantendo-se praticamente constante quando a taxa de deformação foi posteriormente reduzida para os 3,2 m/s.

O aumento observado na tenacidade à fratura da liga de alumínio avaliada no presente estudo, à medida em que a taxa de carregamento é incrementada, é corroborado pelas observações de Anderson [20]. Segundo o autor, a dependência da tenacidade à fratura desta classe de materiais estruturais, quanto à taxa de carregamento imposta, é uma função direta do seu limite de escoamento (mecanismo de fratura controlado por deformação), que tende a crescer com a taxa de deformação, tal como efetivamente ocorre no caso em questão (Figura 6). Assim, altas taxas de deformação, ou carregamento, implicam em maiores aportes de energia requerida para o escoamento do material, de modo a que uma deformação plástica crítica seja atingida na zona de processos de fratura, a qual está inserida na zona plasticamente deformada à ponta da trinca.

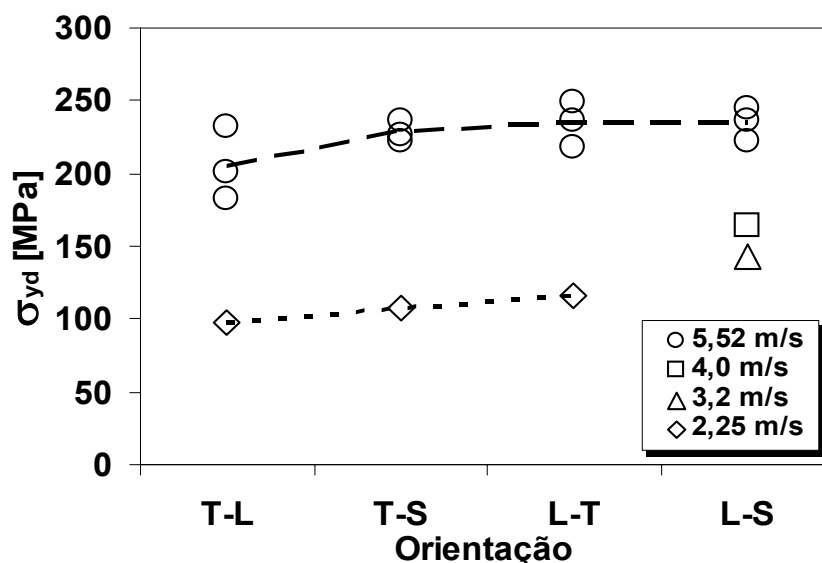


Figura 6. Limite de escoamento dinâmico como função da taxa de carregamento para as quatro orientações de corpos de prova pré-trincados.

4.2 Validação de J_{Id}

Recorrendo-se às Exps.(3) e (4), que impõem os requisitos mínimos dimensionais do cdp para a garantia da predominância de deformação-plana na ponta da trinca, obtiveram-se os resultados plotados na Figura 7. Ela mostra que os valores $J_{Id}(E_i)$ satisfazem, na sua essência, os pré-requisitos estabelecidos para a consideração deste parâmetro de tenacidade à fratura como uma verdadeira propriedade do material.

Por outro lado, a Figura 8 mostra que os valores $J_{Id}(E_{cm})$ foram qualificados como tal apenas para orientações menos tenazes, quais sejam, T-L e T-S. A excessiva plasticidade apresentada na ponta da trinca, no ponto de carga máxima, pelas duas outras orientações de corpos de prova, a saber, L-T, e especialmente L-S, precludem, nestes casos, o desenvolvimento de um nível minimamente aceitável de deformação-plana na respectiva zona de processos de fratura.

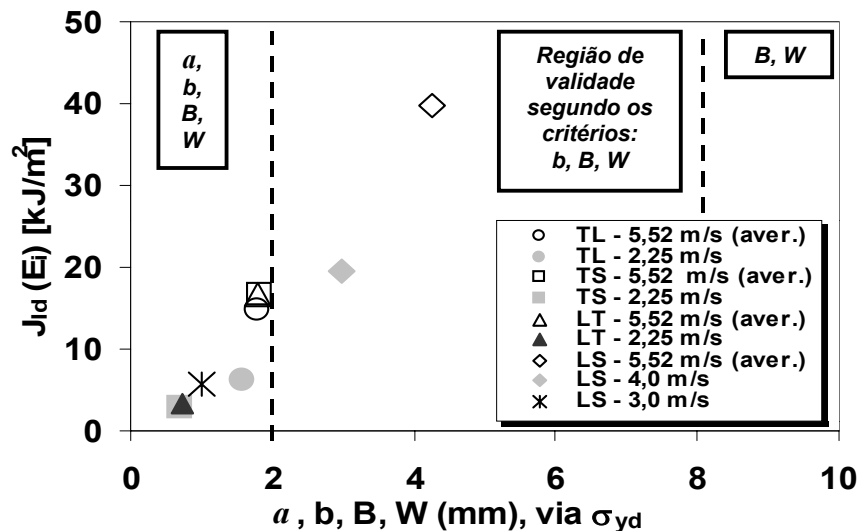


Figura 7. Regiões de validade total e parciais dos resultados $J_{Id}(E_i)$ para as quatro orientações de corpos de prova e várias taxas de carregamento.

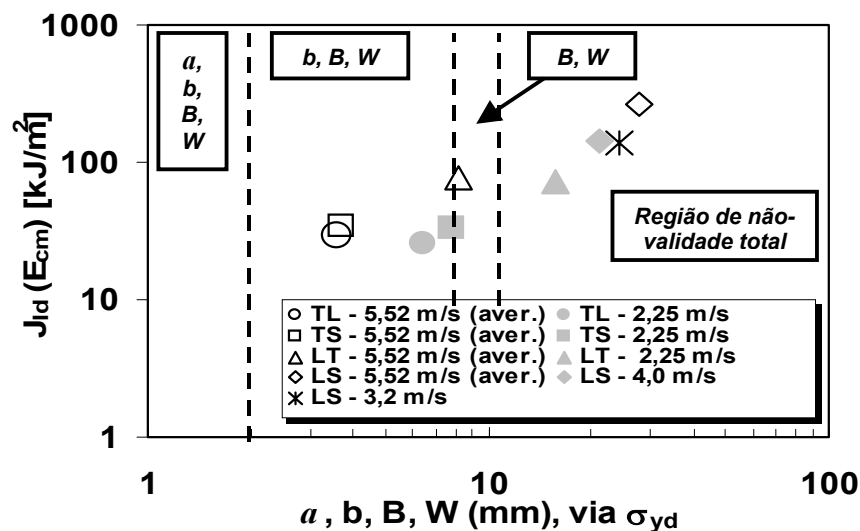


Figura 8. Regiões de validade total e parciais dos resultados $J_{Id}(E_{cm})$ para as quatro orientações de corpos de prova e várias taxas de carregamento.

5. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

- Os resultados de J_{Id} nas quatro orientações avaliadas mostraram que, sob certas condições, o comportamento de fratura da liga de alumínio 7475-T7351 pode ser caracterizado pelos conceitos da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica;
- Sob tais condições específicas, J_{Id} pode ser, portanto, considerado como uma verdadeira propriedade do material.

- Observou-se que a tenacidade à fratura do material é fortemente dependente da orientação do corpo de prova, aumentando significativamente à medida que a taxa de carregamento é incrementada.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Embraer S/A pelo fornecimento da liga de alumínio 7475-T7351 e à FAPESP pelo apoio financeiro (Processo 99/09431-5)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AZEVEDO C.R.F. et al, *Aircraft landing gear failure: fracture of the outer cylinder lug*, Engineering Failure Analysis, v.9, p.1-15, 2002.
2. OWEN. D.M. et al, *Experimental determination of dynamic crack initiation and propagation fracture*, International Journal of Fracture, v.45, p.1-15, 1998.
3. ALVES M. et al; *Impact on aircraft*, Relatório interno Embraer (2003).
4. RODRIGUES, A.R; TOKIMATSU, R.C. *Determinação da tenacidade à fratura dinâmica aparente da liga de alumínio 7050*, COBEM, v.2, pp.224-232, 2001.
5. KOBAYASHI, T et al, *Introduction of a new dynamic fracture toughness evaluation system*, Journal of Testing and Evaluation, v.21, p.145-53, 1993.
6. SAE AMS 4202 C, *Aerospace material specification for aluminum alloy plates*, 2002.
7. RUCKERT, C.O.F.T., *Correlação de estrias de fadiga com espectro de cargas em liga de alumínio aeronáutica*, Diss. Mestrado, EESC-USP, São Carlos, 2003.
8. ASTM Standards, Section 3, v. 03.01, Designation ASTM E399-90, *Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials*, p.485-515, 1991.
9. ASTM Standards, Section 3, v. 03.01, Designation ASTM E23-96, *Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials*, p.1-20, 1997.
10. YAMAMOTO, I.; KOBAYASHI, T., *Evaluation method of dynamic fracture toughness by the computer*, Int. J. Press. Vessels&Piping, v.55, p.295-312, 1993.
11. KOBAYASHI, T. et al, *On the accuracy of measurement of dynamic elastic-plastic fracture toughness*, Engineering Fracture Mechanics, v.26, p.83-94, 1987.
12. KOBAYASHI, T. *Analysis of impact properties of A533 steel for nuclear reactor pressure vessel*, Engineering Fracture Mechanics, v.19, p.49-65, 1984.
13. ANGAMUTHU, K. et al, *Investigation of dynamic fracture toughness (J_{Id}) behavior of strength mismatched*, Engineering Fracture Mechanics. v.64, p.417-432, 1999.
14. RICE, J.R. et al, *Some further results on J-integral analyses and estimates*, ASTM STP (Special Technical Publication) 536, p.231-263, 1973.
15. TRONSKAR, J.P. et al, *Measurement of fracture initiation toughness and crack resistance*, Engineering Fracture Mechanics, v.69, p.321-338, 2002.
16. JIAN, F. et al, *Experimental study on the material dynamic fracture properties by instrumented Charpy*, Journal of Physics IV France, v.110, p.123-129, 2003.
17. ASTM Standards, Section 3, v. 03.01, Designation ASTM E1820-97, *Standard test method for measurement of fracture toughness*, p.24-25, 1997.
18. SERVER, W.L., *Impact three-point bend testing for notched and precracked specimens*, Journal of Testing and Evaluation, v.12, p.29-34, 1978.
19. ZHANG, X.P.; SHI, Y.W., *Comparative studies of several methods to determine the dynamic fracture*, International Journal of Fracture, v.81, p.195-204, 1996.
20. ANDERSON, T. L. *Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications*, 2ed, Boca Raton, CRC Press, 1995.

DYNAMIC FRACTURE TOUGHNESS OF A HIGH STRENGTH SAE AMS 7475-T7351 ALUMINUM ALLOY ¹

*Francisco de Assis Toti⁽²⁾
José Ricardo Tarpani^{(3)*}
Dirceu Spinelli⁽³⁾*

Abstract

The broad utilization of aluminum alloys for structural applications in the aeronautical industry is basically due to their high properties of tensile strength and modulus of elasticity, as well as fatigue loading resistance, which are widely recognized and ascertained. However, there has been little investigation in the literature about the mechanical performance of such a class of structural alloys under impact loading, especially in the presence of like-crack defects. In this work, elastic-plastic dynamic fracture toughness, J_{Id} , of a SAE AMS 7475-T7351 aluminum forged plate was determined for T-L, T-S, L-T e L-S directions. For this purpose, the absorbed energy data obtained from instrumented Charpy impact tests at room temperature were applied to mathematical expressions proposed in the literature. J_{Id} calculated results for the crack initiation criterion were validated according to ASTM-E1820 standard. For the maximum load approach, however, J_{Id} results were validated for T-L and T-S directions only.

Key-words: Charpy impact testing; Dynamic fracture toughness; High strength aluminum alloys.

¹ Paper presented at the 60th ANNUAL CONGRESS OF ABM BRASIL, July 2005, Belo Horizonte - MG, Brazil

² MSc. in Materials Science and Engineering

³ Professor, *jrpan@sc.usp.br

Authors are with the Department of Materials, Aeronautics and Automotive Engineering, Engineering School of São Carlos, The University of São Paulo (SMM-EESC-USP), Brazil