

# DESEMPENHO MECÂNICO DE TRÊS LIGAS ESTRUTURAIS AERONÁUTICAS SOB IMPACTO CHARPY <sup>1</sup>

Francisco de A. Toti<sup>2</sup>  
Ricardo G. Gregui<sup>3</sup>  
Marcelo T. Milan<sup>4</sup>  
Waldek W. Bose Filho<sup>5</sup>  
D. Spinelli<sup>5</sup>  
José R. Tarpani<sup>5</sup>

## Resumo

Materiais utilizados na indústria de construção aeronáutica devem apresentar elevadas propriedades mecânicas, em especial resistência à tração e à fadiga, rigidez e tenacidade sob condições quase-estática e dinâmica, aliadas preferencialmente a uma baixa densidade ou massa específica, de modo a que proporcionem à aeronave uma eficiência adequada em vôo. Por exemplo, ligas de alumínio, de titânio e aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação são freqüentemente concorrentes entre si (à exceção do par alumínio-aço), dependendo da aplicação em serviço, quando a temperatura de uso freqüentemente define a melhor opção no processo de seleção de materiais. No presente trabalho, estas três ligas metálicas estruturais são caracterizadas através de ensaios de impacto Charpy instrumentado em espécimes pré-trincados, e a tenacidade total ao impacto, bem como as suas correspondentes parcelas de iniciação e propagação do trincamento são respectivamente utilizadas como critérios de ranqueamento dos materiais para um máximo desempenho em serviço, considerando, ou não, as respectivas densidades. Concluiu-se que, caso a densidade dos materiais não seja considerada, o aço PH15-5 sempre apresenta, de longe, o melhor desempenho (absoluto), tanto à temperatura ambiente como a 400°C, seguido respectivamente das ligas de titânio e de alumínio. No entanto, quando se considera a densidade dos materiais (desempenhos específicos), observou-se que a liga de alumínio é ao menos tão tenaz quanto à de titânio à temperatura ambiente, enquanto que esta última faz frente, e pode até mesmo superar a performance do aço a 400°C.

**Palavras-chave:** Fratura dinâmica; Impacto Charpy instrumentado; Ligas estruturais aeronáuticas; Propriedades específicas.

## MECHANICAL PERFORMANCE OF THREE AERONAUTICAL GRADE ALLOYS UNDER CHARPY IMPACT TESTING

### Abstract

Structural materials employed in the aeronautical industry must present high mechanical properties, viz. monotonic tensile and fatigue strengths, stiffness, as well as toughness under both quasi-static and dynamic conditions. Moreover, aeronautical grade materials must preferentially exhibit low density in order to perform efficiently in flight. For instance, aluminum and titanium alloys and precipitation hardening (PH) stainless steels are typical candidates, often concurrent metallic materials for aircraft construction, and the operational temperature plays a determinant role in the materials selection. In the present work, these three structural alloys were characterized through instrumented Charpy impact testing of pre-cracked specimens at room temperature and/or 400°C. Impact toughness values associated to crack initiation and crack propagation stages, as well as to the overall fracture process, were employed as ranking criteria for maximum in-service performance of the materials, either considering or not their respective densities. It has been concluded that, if density is not taken in account, the PH steel exhibits by far the best results, followed by titanium and aluminum alloys, respectively. However, when density is accounted for (i.e., specific toughness values) the aluminum alloy is at least as good as the titanium alloy at room temperature, whereas at 400°C, the latter alloy displayed a specific performance similar or even better than the PH steel.

**Key words:** Aeronautical grade alloys; Dynamic fracture; Instrumented Charpy impact testing; Specific properties.

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

<sup>2</sup> Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais pelo Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, Brasil

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia Mecânica pelo Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil

<sup>4</sup> Doutor em Engenharia de Materiais, pesquisador Pós-Doutorando no Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil

<sup>5</sup> Professor do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil, \*jrpan@sc.usp.br

## 1 INTRODUÇÃO

Na construção de estruturas e componentes aeronáuticos, são tradicionalmente utilizadas as ligas de alumínio de alta resistência, visto exibirem ótimas relações resistência mecânica/densidade e rigidez/densidade (i.e., elevadas propriedades específicas), quando comparadas, por exemplo, às ligas ferrosas ditas convencionais. Durante a 2ª Guerra Mundial, foi desenvolvido para a indústria de construção aeronáutica o aço inoxidável martensítico endurecível por precipitação (PH - *precipitation hardening*), visando-se basicamente altas resistências mecânicas e à corrosão. Entretanto, agora já na década de 50, ligas de titânio foram desenvolvidas em profusão para uso militar, sendo indicadas para aplicações extremas, em ambientes de carregamento severo, em meios salinos, além de apresentarem boa conformabilidade, considerável desempenho de corrosão sob tensão, baixa densidade relativamente aos aços. Além disso, exibem uma vida em fadiga comparável à dos metais ferrosos, podendo ser empregadas em temperaturas de até 530°C. Não obstante suas numerosas vantagens, são amplamente reconhecidos os elevados custos de produção e de usinagem das ligas de titânio, causando sérias restrições ao seu uso indiscriminado na indústria de aviões.<sup>[1]</sup> De fato, há atualmente um movimento na indústria aeronáutica civil objetivando a substituição entre os três materiais acima mencionados, de um pelo outro, à exceção do par liga-Al-aço PH. Portanto, é visto como necessário o estabelecimento de critérios de cunho científicos-tecnológicos que permitam, além de pura e simplesmente considerar-se o custo da matéria-prima e de fabricação do material e do correspondente componente estrutural, uma decisão bem fundamentada pela melhor opção caso a caso. Poucos trabalhos, entretanto, se algum na literatura atual, têm se dedicado ao estudo mais detalhado da abordagem de seleção de materiais com base, por exemplo, no desempenho específico dos mesmos, ou seja, no seu desempenho mecânico por unidade de massa.

Para materiais estruturais utilizados na indústria de construção aeronáutica, os quais estão sujeitos a eventos de impacto e à ocorrência de falha súbita ou catastrófica, visto que neste campo de aplicação as propriedades mecânicas tendem a ser exploradas no seu limite, um requisito não menos importante que a resistência mecânica e a rigidez é a tenacidade ao impacto, em especial na existência prévia de um defeito do tipo-trinca. Neste contexto, cabe uma diferenciação entre a “tenacidade à fratura dinâmica”, um critério que estabelece precisamente o início do processo de crescimento rápido de um defeito tipo-trinca pré-existente, e que segue as premissas firmemente estabelecidas pela Ciência da Mecânica da Fratura<sup>[2]</sup> (elástica linear, através do fator  $K$ , e elasto-plástica, por intermédio da integral- $J$ ), e a “tenacidade ao impacto”, que constitui a energia dispendida no início do crescimento e/ou na subsequente propagação propriamente dita do defeito carregado dinamicamente. Não obstante, a rigor, haja uma correlação direta e, até mesmo muito bem definida entre a tenacidade à fratura dinâmica ( $K_{ID}$  e  $J_{ID}$ ) e a correspondente energia dispendida no processo de ruptura (aqui tomada como um índice de tenacidade do material), trabalhar-se unicamente com a energia obtida via integração da área sob diagramas de carga versus deslocamento obtidos num ensaio de impacto Charpy é, sem sombra de dúvidas, muito mais simples e menos restritivo que a abordagem mais, digamos, científica da Mecânica da Fratura. Isto é especialmente verdade quando se considera a questão da validação dos resultados, os quais, nesta última abordagem, devem satisfazer requisitos vinculados ao estado de deformação predominante na ponta da trinca. Enfim, a abordagem mais

tecnológica da tenacidade ao impacto propicia uma comparação mais simples e direta entre os desempenhos dos materiais para fins de seleção para uso em serviço, desde que todas as dimensões dos corpos de prova ensaiados sejam mantidas constantes. Além disso, a abordagem puramente energética possibilita uma comparação dos materiais tanto em termos da resistência à iniciação da trinca, quanto à sua propagação propriamente dita, bem como ao processo global de fratura,<sup>[3]</sup> sendo essas duas últimas quantidades ainda pouco exploradas e devidamente desenvolvidas sob a perspectiva da Mecânica da Fratura. A abordagem de energia absorvida tem, portanto, a vantagem adicional de possibilitar a avaliação do estágio subsequente ao início do trincamento do material, o qual (estágio) pode, inclusive, ter um papel preponderante no desempenho global do material em serviço.

Ligas de alumínio são extensivamente utilizadas na fabricação de vários componentes estruturais, inclusive trens de pouso e asas, estando, portanto, inerentemente submetidas a cargas de impacto durante pousos (eventualmente forçados ou emergenciais) de aeronaves.<sup>[4]</sup> Ainda com relação ao trem de pouso, uma boa parte de sua estrutura é confeccionada com ligas-Ti, que, as quais, por uma questão de alto custo e restrita disponibilidade, têm sido tentativamente substituídas pelos aços inoxidáveis PH.<sup>[1]</sup>

O presente estudo tem, portanto, como objetivo principal contribuir para um melhor entendimento do comportamento mecânico sob impacto Charpy destas três importantes e concorrentes ligas metálicas de construção aeronáutica. Determinou-se assim, em ambas as bases relativa e absoluta (i.e., considerando-se, ou não, a densidade dos materiais), quais as melhores opções para desempenhar em serviço sob as perspectivas de, respectivamente: (i) iniciação do trincamento, (ii) propagação da trinca, e (iii) somatória de ambas as etapas (i) e (ii) do processo global de fratura.

## **2 MATERIAIS E CORPOS DE PROVA**

Os materiais investigados neste estudo incluem: (i) uma liga de alumínio de alta resistência SAE-AMS 7475, tratada para a condição T7351, fornecida na forma de placa forjada com espessura de 60 mm; (ii) uma liga de titânio Ti6AL4V, tratada para a condição recozida conforme norma SAE-AMS 4911, fornecida na forma de placa laminada na espessura de 13,6 mm; (iii) um aço inoxidável martensítico endurecido por precipitação PH15-5, conforme norma SAE-AMS 5659 na condição H1000, fornecido na forma de placa laminada na espessura de 16,6 mm.

As propriedades mecânicas básicas e a densidade (ou massa específica) dos três materiais são listadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Propriedades mecânicas em tração monotônica quase-estática à temperatura ambiente e à 400°C, na direção de trabalho mecânico (Longitudinal), e densidade específica dos materiais ensaiados.<sup>[1,5]</sup>

Material e Temperatura	Módulo E (GPa)	Escoamento S <sub>E</sub> (MPa)	Resistência S <sub>R</sub> (MPa)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
Liga-Al à 25°C	71	395	470	2,75
Liga-Ti à 25°C	114	830	900	4,56
Liga-Ti à 400°C	80	595	642	-
Aço PH à 25°C	196	1035	1100	7,94
Aço PH à 400°C	166	878	943	-

Corpos de prova de impacto Charpy tipo-A com dimensões 10x10x55 mm<sup>3</sup> foram extraídos das placas base segundo as orientações L-T e L-S. Um entalhe central com profundidade de 1 mm foi introduzido nos espécimes por intermédio de eletroerosão, utilizando-se um filamento de tungstênio com diâmetro 0,2 mm. Em seguida os corpos de prova foram pré-trincados sob fadiga, em um sistema de ensaios MTS<sup>®</sup> 810, até uma profundidade total de trinca de 2 mm ( $a/W = 0,2$ ). Utilizou-se no pré-trincamento uma razão de carga  $R = 0,1$ , um fator de intensidade de tensões elásticas máximo ( $K_{máx}$ ) de 12 MPa $\sqrt{m}$ , aplicado sob uma frequência de 50 Hz para a liga-Al e de 30 Hz para o aço PH e a liga-Ti.

### 3 MÉTODOS

#### 3.1 Ensaio de Impacto Charpy Instrumentado

Os ensaios de impacto Charpy foram realizados à temperatura ambiente e a 400°C, em um sistema instrumentado e informatizado Instron-Wolpert<sup>®</sup> PW30, que fornece as curvas de carga (P) vs. tempo (t) vs. deslocamento ou deflexão (s) vs. energia absorvida (E) durante o evento de impacto.

Foram ensaiados três corpos de prova para cada um dos materiais nas duas orientações selecionadas de corpos de prova, sob uma velocidade de impacto do martelo de 5,52 m/s, o que corresponde a uma energia disponibilizada no momento do impacto de 300 J.

#### 3.2 Critérios de Início de Trincamento e de Propagação da Trinca

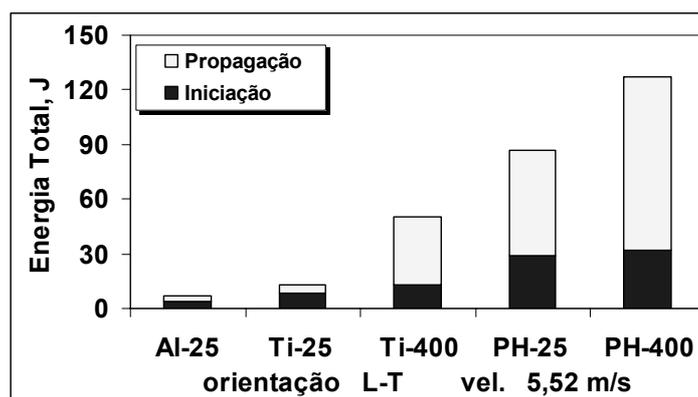
Adotou-se neste trabalho a abordagem mais simples e amplamente empregada na literatura,<sup>[3,6]</sup> de que a trinca pré-existente inicia a sua propagação, ou seja, o seu movimento inicial de avanço (aqui denominado simplesmente estágio de iniciação, relacionado à energia de iniciação,  $E_i$ ), exatamente no ponto de carga máxima suportada pelo corpo de prova impactado. Conseqüentemente, assume-se que o estágio complementar de propagação propriamente dita do defeito, vinculado a uma correspondente energia de propagação,  $E_p$ , se estabelece após a carga máxima ser atingida. Esta ressalva se faz necessária visto que é amplamente reconhecido na

literatura que, a rigor, a iniciação do processo de trincamento se verifica, nos materiais elasto-plásticos, em algum ponto situado entre o início do escoamento macroscópico e a carga máxima.<sup>[7,8]</sup> Porém, para os objetivos do presente estudo, a abordagem dita mais simplificadora é tida como aceitável.<sup>[3]</sup>

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

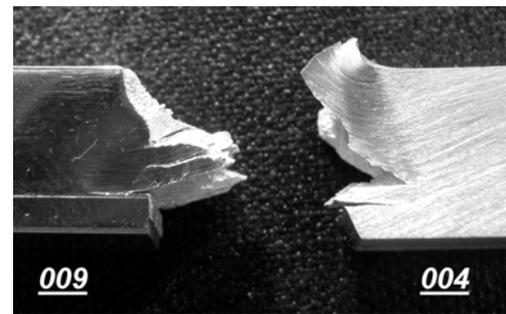
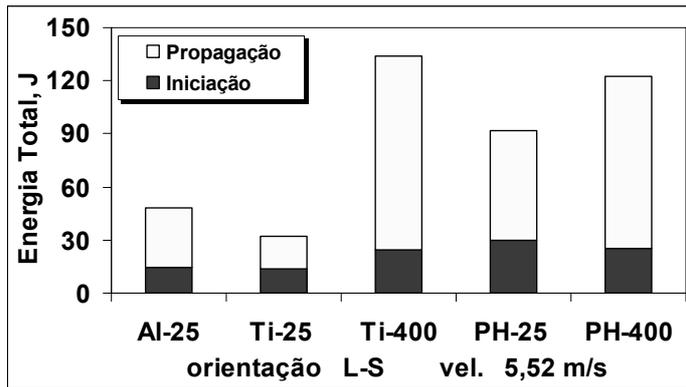
A Figura 1 mostra a comparação dos valores de energias  $E_i$ ,  $E_p$  e  $E_t$  (onde a energia total de fratura é dada pela soma das duas parcelas complementares, ou seja,  $E_t = E_i + E_p$ ) consumidas no impacto dos espécimes confeccionados em ligas de Al e Ti e em aço PH, segundo a orientação L-T, sob a velocidade de carregamento de 5,52 m/s, nas temperaturas de 25 e 400°C.

À temperatura ambiente, o aço PH 15-5 apresenta excepcionalmente elevados índices de tenacidade dinâmica, seguido muito de longe pela liga de titânio Ti6Al4V, e esta pela de alumínio 7475. A 400°C, o desempenho do aço PH é praticamente o mesmo que à 25°C no que concerne a energia  $E_i$ , porém o material apresenta acréscimo substancial na parcela de energia  $E_p$ , que, por sua vez, se reflete na energia total  $E_t$ . A liga-Ti segue basicamente a mesma tendência do aço, porém o efeito da temperatura no aumento de  $E_p$ , e, por conseqüência, em  $E_t$ , é simplesmente extraordinário.



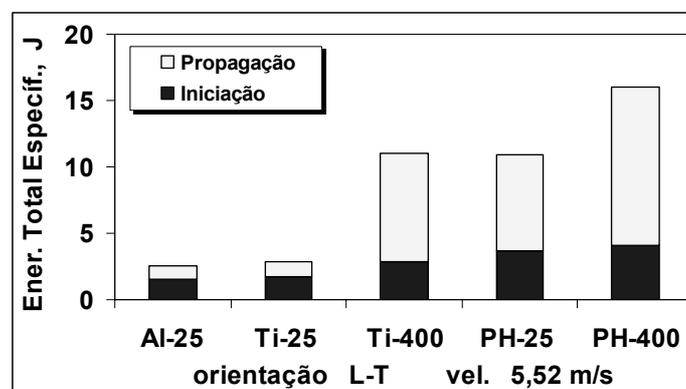
**Figura 1.** Valores de energia total ( $E_t$ ) particionada entre iniciação ( $E_i$ ) e propagação ( $E_p$ ) para as ligas de Al, Ti e aço PH na orientação L-T, na velocidade de impacto de 5,52 m/s e duas temperaturas de ensaio.

A Figura 2a mostra idêntica comparação para os três materiais, porém agora segundo a orientação L-S. Neste caso, o aço PH apresenta, indistintamente para ambas as temperaturas avaliadas, um comportamento praticamente idêntico ao observado na orientação L-T. No entanto, a liga-Ti praticamente triplica todos os seus valores de energia absorvida nesta orientação frente à L-T, chegando até mesmo a superar o PH na temperatura de 400°C, notadamente como resultado da sua maior parcela  $E_p$ , se comparada à exibida pelo material concorrente. Por sua vez, a liga-Al praticamente sextuplicou a energia  $E_t$  consumida no processo global de fratura, superando mesmo a liga-Ti como decorrência de um acréscimo impressionante da sua parcela de energia  $E_p$ , de aproximadamente uma ordem de grandeza. Este fato basicamente decorreu da forte texturização microestrutural exibida pela liga-Al, que ficou patente e gravada nas respectivas superfícies de fratura dos espécimes, conforme mostram os perfis ilustrados na Figura 2b.



**Figura 2.** (a) Valores de energia total ( $E_t$ ) particionada entre iniciação ( $E_i$ ) e propagação ( $E_p$ ) para as ligas de Al, Ti e aço PH na orientação L-S, na velocidade de impacto de 5,52 m/s e duas temperaturas de ensaio; (b) Superfícies de fratura da liga-Al, com trinca e entalhe.

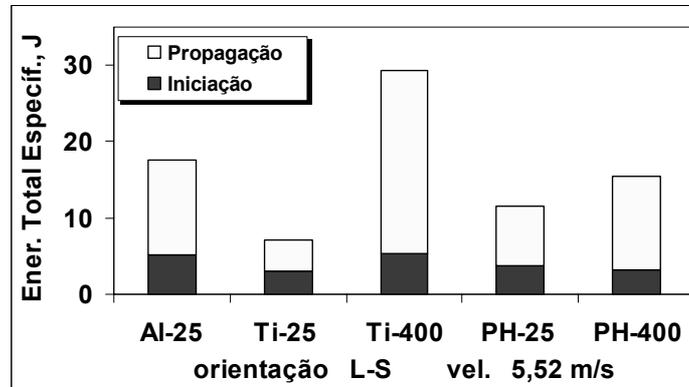
As Figuras 3 e 4 reproduzem respectivamente as Figuras 1 e 2, porém fornece os resultados na forma de energias específicas através da consideração da densidade dos diversos materiais (de fato, a partir de suas gravidades específicas, relativamente à da água, que é de 1 g/cm<sup>3</sup>). Obviamente, os valores de energia ( $E_t$ ,  $E_i$  e  $E_p$ ) se mantêm em idênticas proporções entre as Figuras 1 e 3 (orientação L-T), e Figuras 2 e 4 (L-S), quando a comparação é realizada para um dado material. No entanto, quando a comparação é realizada entre distintos materiais, verifica-se que as mudanças de desempenho das três classes de energia são substanciais, e se manifestam logicamente em idênticas proporções quando se consideram ambas as orientações de corpos de prova, L-T e L-S.



**Figura 3.** Valores de energia total específica particionada entre as de iniciação e de propagação para as ligas de Al, Ti e aço PH na orientação L-T, sob uma velocidade de carregamento de 5,52 m/s e em duas temperaturas de ensaio.

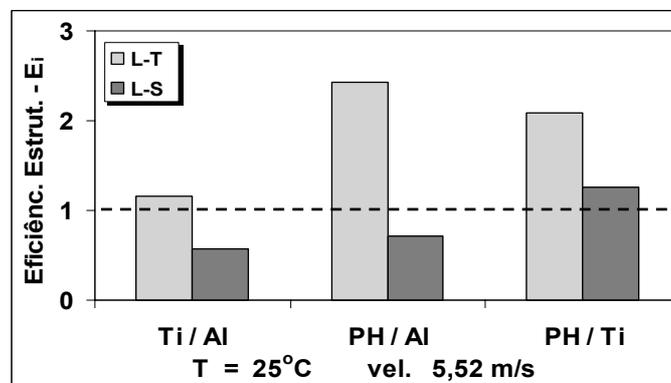
Da Figura 3, conclui-se que o desempenho da liga-Al à temperatura ambiente se aproxima muito daquele exibido pela liga-Ti, enquanto que esta última tende a fazer frente ao aço PH à temperatura de 400°C.

Na Figura 4, são notórios os ótimos desempenhos específicos da liga-Al à temperatura ambiente e de Ti a 400°C frente a seus concorrentes. De fato, a liga-Al supera até mesmo o aço PH a 25°C, enquanto que a de Ti é nitidamente superior à liga ferrosa na temperatura mais elevada.



**Figura 4.** Valores de energia total específica particionada entre as de iniciação e de propagação para as ligas de Al, Ti e aço PH na orientação L-S, sob uma velocidade de carregamento de 5,52 m/s e em duas temperaturas de ensaio.

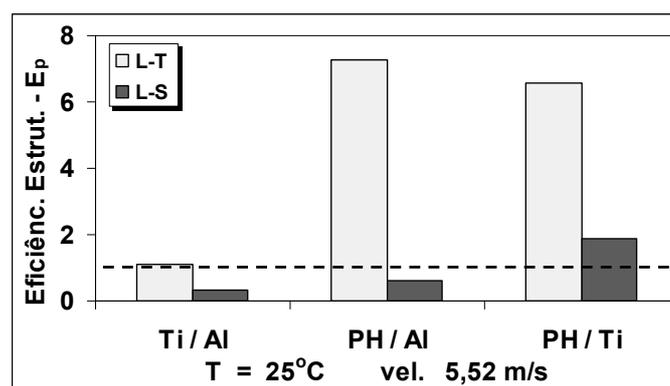
A Figura 5 compara os valores da eficiência estrutural (um parâmetro definido como a razão entre uma dada propriedade específica de materiais estruturais concorrentes), relativamente à energia de início de trincamento,  $E_i$ , para os seguintes pares de materiais, Ti / Al, PH / Al, e PH / Ti, à 25°C sob uma velocidade de impacto de 5,52 m/s. Os resultados revelam por exemplo que, na orientação L-T, um componente confeccionado em liga-Al seria, de modo a satisfazer um determinado critério de projeto, estabelecido em termos de uma valor mínimo de  $E_i$ , cerca de 16% mais pesado que o mesmo componente feito em liga-Ti, e seria cerca de pouco menos que duas e meia (2,5) vezes mais pesado que aquele fabricado com aço PH. Nestas circunstâncias, sendo a liga-Al menos densa que ambos a liga de Ti e o aço PH, componentes muito mais volumosos resultariam da liga mais leve ora avaliada; por outro lado, o confeccionado em aço ocuparia o menor espaço físico dentre materiais em questão (o que constituiria num fator determinante, por exemplo, na seleção de materiais para casos em que economia de volume é essencial, como por exemplo em componentes de trens de pouso). Se a liga-Ti é confrontada ao aço PH, ainda na orientação L-T, conclui-se que o primeiro pesaria pouco mais que o dobro do segundo.



**Figura 5.** Eficiência estrutural relativamente à energia de iniciação de trinca,  $E_i$ , entre os pares de ligas Ti / Al, PH / Al e PH / Ti, nas orientações L-T e L-S, a 25°C e sob uma velocidade de impacto de 5,52 m/s.

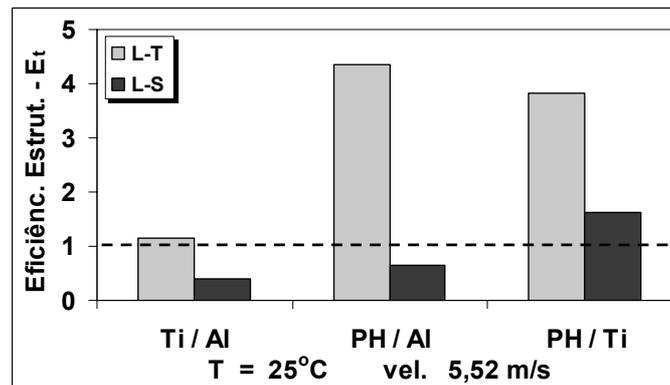
Comparando-se agora Al, Ti e PH segundo a orientação L-S, um dado componente a operar em baixas temperaturas seria cerca de 75% mais pesado se em liga-Ti, e aproximadamente 40% a mais se em aço PH, contra idêntico elemento estrutural (em formato, porém não em volume) daquele fabricado em liga-Al. Tais notáveis diferenças se verificam em função da microestrutura fortemente texturizada da liga-Al nesta orientação, que acresce substancialmente a capacidade de absorção de energia de iniciação, e particularmente de propagação de trinca, frente à orientação L-T. Quando confrontamos diretamente a liga-Ti e o aço PH, a Figura 5 nos mostra que a vantagem quanto à economia de peso é sempre do aço. Assim, na orientação L-T, um componente em aço pesaria pouco menos da metade do confeccionado em liga-Ti, enquanto que para a L-S, esta vantagem não seria tão acentuada, com o componente feito em aço tendo cerca de 80% da massa daquele em Ti.

A Figura 6 compara os valores da eficiência estrutural relativamente à energia de propagação de trinca,  $E_p$ , para os três pares de materiais à temperatura ambiente, sob uma taxa de carregamento por impacto de 5,52 m/s. Na orientação L-T, um componente confeccionado em liga-Al seria, para satisfazer um determinado critério de projeto em termos de um valor mínimo aceitável de  $E_p$ , cerca de 10% mais pesado que o mesmo componente feito em liga-Ti, e seria algo mais que impressionantes sete (7) vezes mais pesado que o de um fabricado em aço. Comparando-se agora Al, Ti e PH segundo a orientação L-S, Al seria desta feita mais interessante que Ti, e mesmo que o PH: Al teria cerca de um terço da massa de Ti e pouco menos que dois terços da de aço. Como mencionado anteriormente, tais notáveis diferenças de desempenho se verificam em função da microestrutura fortemente texturizada da liga-Al, que acresce substancialmente a capacidade de absorção de energia pelo material, especialmente na etapa de propagação de trinca, superando o desempenho de ligas muito mais caras segundo a orientação L-S. Os resultados obtidos chamam à atenção também pelo notável desempenho relativo do aço PH na orientação L-T frente às duas outras ligas estruturais.



**Figura 6.** Eficiência estrutural relativamente à energia de propagação de trinca,  $E_p$ , entre os pares de ligas Ti / Al, PH / Al e PH / Ti, nas orientações L-T e L-S, a 25°C e sob uma velocidade de impacto de 5,52 m/s.

A Figura 7 compara os valores da eficiência estrutural considerando-se agora a capacidade global de absorção de energia durante o processo integral de fratura do espécime,  $E_t$ , à temperatura de 25°C numa velocidade de carregamento por impacto de 5,52 m/s; basicamente, os resultados de  $E_t$  nos fornecem uma média entre os desempenhos relativos aos índices  $E_i$  e  $E_p$ . Assim, chamam à atenção o desempenho superior da liga-Al frente a ambos liga-Ti e aço PH na orientação L-S, a quase equivalência entre Ti e Al na orientação L-T, e a expressiva superioridade do aço PH nesta última orientação de corpos de prova.

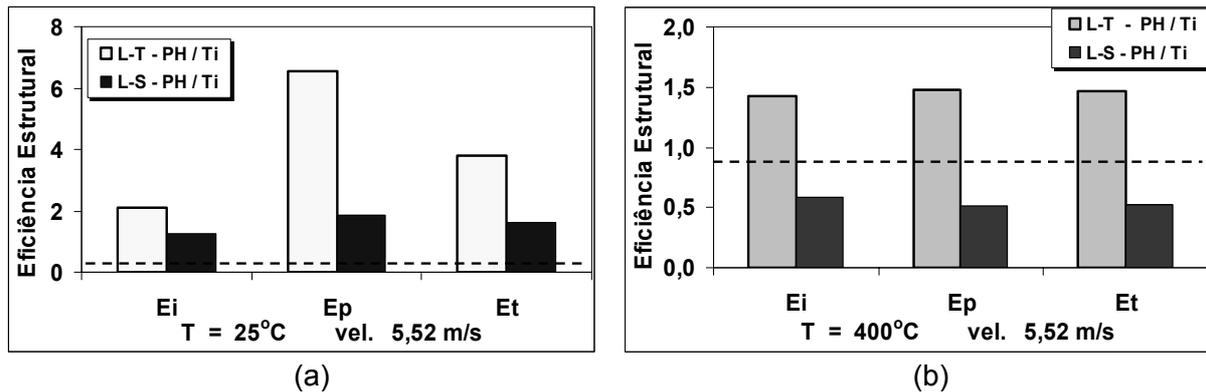


**Figura 7.** Eficiência estrutural relativamente à energia total para uma fratura completa,  $E_t$ , entre os pares de ligas Ti / Al, PH / Al e PH / Ti, nas orientações L-T e L-S, a temperatura de 25°C e sob um evento de impacto a 5,52 m/s.

A Figura 8 finalmente compara a eficiência estrutural de Ti e PH considerando-se todos três critérios de absorção de energia de fratura, quais sejam,  $E_i$ ,  $E_p$ , e  $E_t$ , à temperatura de 25°C (tal como já anteriormente plotados) e a 400°C, sob uma taxa de carregamento de 5,52 m/s.

Nota-se que, à temperatura ambiente, o aço é sempre mais vantajoso, em termos de propriedades de impacto, que a liga-Ti. Na orientação L-T, por exemplo, considerados respectivamente os critérios  $E_i$ ,  $E_p$  e  $E_t$ , um componente em aço PH pesaria, obedecendo-se àquela seqüência, respectivamente pouco menos da metade, cerca de 15%, e pouco mais de um quarto do peso da mesma peça confeccionada em liga de titânio. Digno de nota nestas condições é o muitíssimo superior desempenho do aço sobre o titânio no quesito de energia consumida no estágio de propagação da trinca rápida. Na orientação de trinca L-S, no entanto, a liga-Ti reduz sua desvantagem para com o aço PH: neste sentido, os pesos em aço seriam, portanto, de 80%, ~ 55% e ~ 62%, respectivamente, da massa em titânio.

Na temperatura de 400°C (por exemplo, em aplicações estruturais nas proximidades dos reatores de uma aeronave), e na orientação L-T, a vantagem de economia de peso advinda do uso do aço ao invés do titânio é praticamente a mesma (o aço pesaria pouco menos que 70% da liga-Ti) independentemente do critério de projeto em termos de energia absorvida ( $E_i$ ,  $E_p$  ou  $E_t$ ). Já na orientação L-S, ocorre uma inversão de comportamento, bastante favorável à liga-Ti, de amplitude similar para os critérios  $E_i$ ,  $E_p$  e  $E_t$ : nestas circunstâncias, esta liga pesaria pouco mais da metade do aço.



**Figura 8.** Eficiência estrutural à temperatura ambiente (a), e à 400°C (b), avaliadas para a liga-Ti e aço PH com bases respectivamente nas energias de iniciação,  $E_i$ , propagação,  $E_p$ , e total,  $E_t$ , consumidas na fratura dos espécimes Charpy pré-trincados, segundo às orientações L-T e L-S.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho prospectivo objetivou introduzir o conceito de propriedades específicas de impacto Charpy para a seleção de ligas metálicas de construção aeronáutica. De acordo com a proposta, materiais com tenacidade dinâmica superior, por unidade de massa, contribuem decisivamente para o aumento de eficiência de voo da frota. Embora a abordagem possa não ter um apelo tão significativo na aviação militar, onde a busca por redução de volume frequentemente supera a necessidade por redução de massa, haja vista que manobrabilidade, agilidade e não-detectabilidade são quesitos fundamentais para caças a jato, a aviação comercial é bastante dependente da redução de peso, visto que economia de combustível, redução da motorização e aumento da autonomia de voo são fatores primordiais à sobrevivência das frotas civis. De acordo com os resultados obtidos na orientação L-T, a qual é a mais propensa a desenvolver trincamentos em estruturas e componentes sob condições reais de operação em serviço, ligas menos densas tendem invariavelmente a ocupar um volume superior às mais densas. Neste sentido, poder-se-ia inclusive tirar vantagem desta característica, por exemplo, através de artifícios de projeto que propiciassem um aumento da rigidez estrutural do componente, de modo a disponibilizar mais espaço interno para o transporte de carga paga (incluindo passageiros), adicionalmente àquele aumento de carga paga possibilitado exclusivamente pela redução global de peso da aeronave, desde que tais artifícios não penalizassem excessivamente a aerodinâmica do veículo.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Embraer S/A pelo fornecimento das ligas ensaiadas, e à Fipai por prover bolsa de estudos ao mestrando R.G.G..

## REFERÊNCIAS

- 1 Gregui, R.G., *Tenacidade à Fratura Dinâmica de Liga de Titânio Ti6Al4V e Aço Inoxidável PH15-5*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, 2005.
- 2 Anderson, T.L., *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 2° Edition, CRC Press, Inc., 1995.
- 3 Ghoneim, M.M., *Instrumented Impact Properties of Some Advanced Nuclear Reactor Pressure Vessel Steels*, Journal of Materials Engineering and Performance, v.5, p.328-334, 1996.
- 4 Azevedo, C.R.F., *Aircraft landing gear failure: fracture of the outer cylinder lug*, Engineering Failure Analysis, v.9, p.1-15, 2002.
- 5 Toti, F.A., *Tenacidade à fratura dinâmica de uma liga de alumínio de alta resistência AMS 7475-T7351*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, 2004.
- 6 Zhang, X.P., *Comparative studies of several methods to determine the dynamic fracture*, International Journal of Fracture, v.81, p.195-204, 1996.
- 7 Kobayashi, T., *Introduction of a new dynamic fracture toughness evaluation system*, Journal of Testing and Evaluation, v.21, p.145-53, 1993.
- 8 Toti, F.A., *Tenacidade à fratura dinâmica de uma liga de alumínio de alta resistência SAE AMS 7475-T7351*, 60° Congresso da ABM, Belo Horizonte, 2005.