

DESEMPENHO EM FADIGA DE MATERIAIS METÁLICO E COMPOSTO CONCORRENTES DA INDÚSTRIA AERONÁUTICA¹

José R. Tarpani²
Carlos E. G. de Castro³
Marcelo T. Milan⁴

Resumo

Ensaio de curva tensão-vida (S-N) em fadiga foram conduzidos em corpos de prova de laminado híbrido metal-fibra Glare-5 e de liga monolítica Al-2024-T3, na presença de concentradores de tensão. Utilizaram-se nos experimentos três distintas razões de carga e frequências de aplicação da carga cíclica. Concluiu-se que o desempenho em fadiga de Glare é inferior ao da liga-Al concorrente sob todas as condições impostas nos ensaios, em especial na presença de um reverso compressivo. Nesta última condição, o baixo rendimento do laminado metal-fibra foi creditado particularmente à relativamente baixa resistência das fibras fortalecedoras de vidro aos esforços de compressão, associada à reduzida rigidez estrutural das lâminas de liga-Al, ambos favorecendo o desenvolvimento de delaminações nas numerosas interfaces do metal-fibra, ou seja, fatores intrinsecamente associados à natureza híbrida e laminar de Glare. A clara deficiência de Glare-5 em resistir à nucleação de trincas (e outros danos) de fadiga, que constitui o estágio controlador do processo global de fratura em experimentos de curvas S-N, foi classificada como bastante preocupante, a despeito de sua reconhecidamente elevada resistência à propagação de trincas, especialmente em vista do possível estabelecimento de um quadro de danos em múltiplos sítios (*multiple site damage*) em estruturas aeronáuticas extensivamente rebitadas.

Palavras-chave: Fadiga; Laminados metal-fibra; Ligas de alumínio; Materiais aeronáuticos.

FATIGUE PERFORMANCE OF CONCURRENT METALLIC AND COMPOSITE MATERIALS IN AERONAUTICAL INDUSTRY

Abstract

Stress-life (S-N curve) fatigue testing was carried out in fiber-metal hybrid laminate Glare-5 and monolithic AA2024-T3 alloy materials, in testpieces containing stress concentrators. Three distinct load ratios and cyclic loading frequencies were employed in the experiments. It has been concluded that the fatigue performance of Glare is always inferior to the aluminum alloy, especially under compressive load reversals ($R < 0$). In such condition, the low performance of the laminate composite was credited to its intrinsic hybrid and laminar nature, as for instance, the low compressive strength of the glass fibers and the low buckling strength of the aluminum alloy layers, which favored delamination. Despite its well recognized high fatigue crack growth resistance, the remarkable deficiency of Glare-5 in resisting to fatigue crack nucleation, which constitutes the controlling stage of the global fracture process in S-N experiments, was considered of a major concern, specially in view of a multiple site damage scenario in extensively riveted aircraft structures.

Key words: Aircraft materials, Aluminum alloys, Fatigue, Fiber-metal laminates.

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

² 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

³ Engenheiro Mecânico (ênfase em Aeronaves) pelo Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil

⁴ 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

1 OBJETIVO

Objetivou-se neste trabalho prospectivo avaliar o comportamento em fadiga de baixo e médio ciclos, tipicamente levando à falha do espécime até os 10^5 ciclos de carregamento, de um laminado híbrido metal-fibra (LMF) da classe Glare[®], comparativamente à liga monolítica de alumínio de alta resistência 2024-T3, para diferentes razões de tensão ($R = \text{carga mínima} / \text{carga máxima}$), utilizando-se corpos de prova contendo concentradores de tensão.

Cabe ressaltar que a liga de alumínio monolítica 2024-T3, avaliada neste estudo, compõe a fase metálica do laminado híbrido Glare-5, sendo ambos os materiais, portanto, concorrentes entre si na indústria de construção aeronáutica, com o primeiro deles tendendo a ser, cada vez mais, substituído pelo segundo.

2 INTRODUÇÃO

O material composto Glare é um laminado híbrido metal-fibra formado por camadas de liga de alumínio intercaladas com camadas de um pré-impregnado de fibras resistentes de vidro com resina termo-rígida epóxi. Este material tem demonstrado ser um forte candidato à construção de fuselagens de aeronaves (e.g., Airbus A380) por exibir ótima resistência à propagação de trincas, em especial sob fadiga, aliada a uma baixa densidade, relativamente às ligas de alumínio.⁽¹⁾

O grau particular de Glare conhecido como Glare-5 é o resultado de um esforço focado na otimização do arranjo entre lâminas de metal e fibras de reforço visando-se um máximo desempenho sob cargas de impacto, sendo, portanto, fortemente recomendável para estruturas aeronáuticas tais como *bulkheads*, invólucro de contenção de fragmentos da turbina, soalhos e bordos de ataque, estando, em maior ou menor grau, submetidos a cargas de fadiga. Não obstante, a rigor, tais componentes estruturais não sejam classificados como primários numa aeronave, as conseqüências de sua eventual falha em serviço não devem ser menosprezadas, podendo, em um cenário mais dramático, levar inclusive à perda do avião. Por exemplo, soalhos e *bulkheads* são partes integrantes, juntamente à fuselagem, da estrutura internamente pressurizada de aeronaves comerciais e executivas, de sorte que uma falha de qualquer destes componentes (por exemplo, através da aplicação dos ciclos sucessivos de pressurização/despressurização da cabine) poderia levar à depressurização imediata da cabine em elevadas altitudes e seus resultados imprevisíveis.

Não obstante possa ser argüido que as ótimas e reconhecidas propriedades de resistência ao crescimento de trincas de Glare (i.e., sua elevada tolerância a danos), que se estabelece pela atuação do mecanismo denominado "*crack bridging*",⁽²⁻⁴⁾ o qual é amplamente caracterizado na literatura através das chamadas curvas $a-N$ e $da/dN \times \Delta K$, possam evitar a falha mais catastrófica do laminado híbrido em serviço, há de se considerar a possibilidade do desenvolvimento de danos tipo-trincas simultaneamente em múltiplos locais (*multiple site damage - MSD*). Neste caso, sítios ou núcleos de trincas, originados particularmente nas furações de rebites (que constituem detalhes construtivos ainda inevitáveis, presentes em grande número e densidade mesmo nas aeronaves comerciais mais modernas, e atuando como concentradores e intensificadores de tensões), podem, em última instância, levar à falha catastrófica de estruturas e componentes aeronáuticos através da comunhão instantânea dos pequenos defeitos que, avaliados individualmente, poderiam ser mesmo considerados inócuos à sua integridade estrutural. Daí a importância vital da

adequada compreensão do estágio de iniciação de danos em laminados metal-fibra.^(5,6) Os ensaios de curvas tensão-vida (curvas S-N) visam basicamente a determinação de valores de tensão (S), e do correspondente número de ciclos (N), que um material resiste à introdução de danos durante o carregamento cíclico, estando seus resultados direcionados a projetos mais conservadores, com base na abordagem de resistência a danos (*safe-life*) em oposição ao chamado *damage tolerant*. Neste sentido, vale ainda lembrar uma característica intrínseca dos LMFs quando rebitados, que é a de desenvolverem trincamentos em lâminas metálicas internas à junta, invisíveis portanto à observação óptica e mesmo à maioria dos métodos de inspeção não-destrutiva.⁽⁷⁾

No presente trabalho, utilizou-se o método das curvas S-N para caracterizar o comportamento em fadiga do Glare-5 comparativamente ao da liga concorrente de alumínio 2024-T3, de modo a enfatizar o desempenho destes materiais estruturais em resistir à iniciação de trincas (e danos correlatos nos LMFs), com a falha do espécime ensaiado geralmente ocorrendo por fratura rápida subsequente à nucleação de defeitos.

3 MATERIAIS E CORPOS DE PROVA

Foram ensaiados o laminado metal-fibra Glare-5, em que 4 camadas de composto epóxi-fibras unidirecionais de vidro seguem o arranjo $0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$, sendo ensanduichadas por duas lâminas de liga Al-2024-T3 com espessura de 0,5 mm, perfazendo uma espessura integral de 1,6 mm, doado pela empresa Aviation Equip. Ltd. (USA), e uma liga de alumínio 2024-T3, fornecida pela Embraer S/A na forma de chapas com idêntica espessura ao Glare-5. As microestruturas das fases composta e metálica de Glare são mostradas na Figura 1.

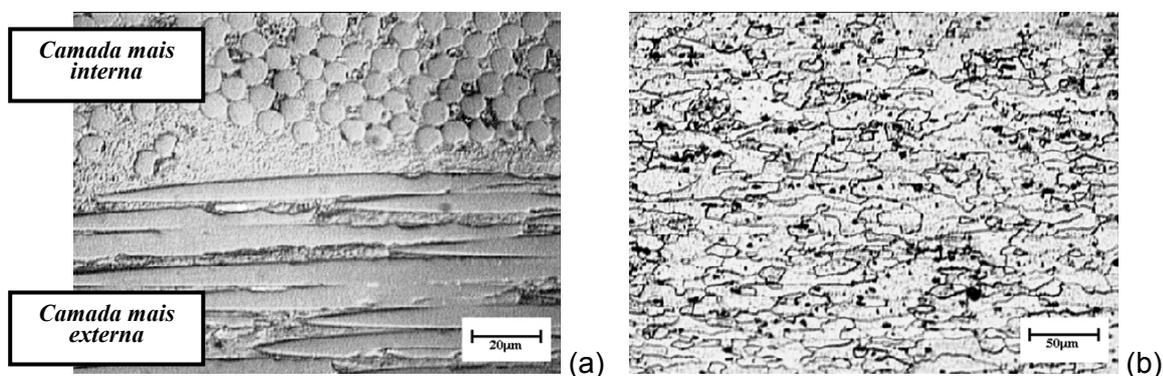


Figura 1. Microestruturas da fase fortalecedora de fibra de vidro embebida em resina epóxi (a), e da lâmina adjacente de liga-Al 2024-T3 (b) do Glare-5. A direção longitudinal da chapa (0°) corresponde à largura da página.

Os corpos de prova foram usinados a partir das chapas recebidas, segundo a geometria “gravata” (*dog bone*), vista em detalhes na Figura 2, conforme sugerido na norma ASTM-E606 (8), destinada originalmente aos materiais metálicos.

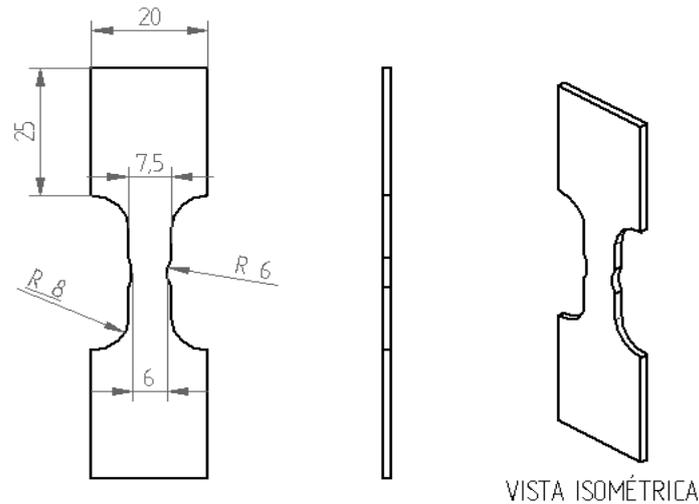


Figura 2. Projeto do corpo de prova para ensaios de tração e de fadiga axial em Glare-5 e liga-Al 2024-T3, contendo concentradores duplos de tensão de formato circular (K_t líquido calculado $\cong 1,25$).

Após o procedimento de fresagem dos entalhes laterais com uma ferramenta circular com diâmetro nominal de 12 mm, os corpos de prova foram lixados lateralmente (lixas metalográficas até granulação 2000) de modo extremamente cuidadoso para eliminar quaisquer vestígios de marcas superficiais de usinagem. A operação visou retirar qualquer potencial sítio geométrico que pudesse atuar como iniciador de trincas nos espécimes, já que o objetivo básico do ensaio de curvas S-N é exatamente o de mensurar a resistência intrínseca dos materiais à nucleação e propagação incipiente de trincas de fadiga.

As propriedades mecânicas de tração monotônica do material (Tabela 1) foram determinadas a partir de corpos de prova idênticos aos fadigados, em ensaios conduzidos à taxa de 1 mm/min, adotando-se extensômetro com abertura inicial (L_0) de 8 mm. Estes resultados preliminares serviram de referência para os níveis de tensão adotados nos ensaios de curvas S-N.

Tabela 1. Resultados de tração monotônica axial de Glare-5 e liga 2024-T3 à temperatura ambiente (média de três ensaios para cada material avaliado).

Glare-5	
Propriedade	Valores
Módulo de elasticidade em tração	$70 \pm 0,7$ GPa
Resistência à tração	575 ± 18 MPa
Resistência ao escoamento*	300 ± 11 MPa
Deformação na carga máxima	$2,5 \pm 0,2\%$
Alumínio 2024-T3	
Propriedade	Valores
Módulo de elasticidade em tração	$85 \pm 0,7$ GPa
Resistência à tração	497 ± 12 MPa
Resistência ao escoamento	375 ± 13 MPa
Deformação na carga máxima	$7,4 \pm 0,6\%$

* Melhor definida como o início de um comportamento não-linear do material.

4 EXPERIMENTAL

Os ensaios de curvas tensão-vida (S-N) foram conduzidos a 25°C, sob controle de carga (ou tensão), em um sistema servo-hidráulico MTS®-810, utilizando-se respectivamente três valores para a razão de carga ($R = \text{carga mínima}/\text{carga máxima}$), quais sejam, $R = -0,1$, $R = +0,1$ e $R = -1$, geralmente sob uma frequência constante de carregamento de 5 Hz. Alguns ensaios foram conduzidos em frequências de 1 e 50 Hz, respectivamente, de modo a se estabelecerem tendências com relação a esta variável. Em alguns casos, a deformação cíclica dos espécimes foi monitorada durante todos o decorrer do ensaio, utilizando-se, para isso, um extensômetro com abertura inicial (L_0) de 8 mm, idêntico àquele empregado nos ensaios prévios de tração quase-estática.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3, correspondente ao Glare-5, observa-se que para $R < 0$ (fadiga reversa) a vida em fadiga é substancialmente mais curta que para R positivo (flutuante). Isto se deve provavelmente aos efeitos do reverso de tensão compressiva que incentiva, na fase metálica, a criação das chamadas intrusões/extrusões (defeitos do tipo-entalhe em níveis microscópicos que atuam como sítios nucleadores de trincas), além de afiar a ponta de uma trinca já em estágio de propagação (mesmo que incipiente), tornando-a assim mais crítica (ou daninha) durante a aplicação do reverso seguinte de tração. Além disso, a aplicação do reverso de compressão, sempre seguido de um reverso trativo, favorece ou o amolecimento cíclico, incentivando assim ainda mais a geração das intrusões/extrusões, ou o endurecimento cíclico, desta feita fragilizando o material metálico. No primeiro caso, haveria uma aceleração do estágio de iniciação de trincas, enquanto que, no segundo, o estágio de propagação seria favorecido; porém, em quaisquer dos casos, ocorreria a fratura mais rápida do espécime ensaiado, se comparado ao mesmo material submetido a um esforço do tipo tração-tração (flutuante). O papel controlador exercido pela fase metálica na vida em fadiga de baixo ciclo dos LMFs tem sido reconhecido na literatura, e as eventuais diferenças de desempenho entre Glare e a liga monolítica de alumínio correspondente são em geral creditadas às tensões residuais advindas do processo de consolidação (cura) do laminado durante sua fabricação,⁽²⁾ e à facilitação da nucleação de trincas na fase metálica no laminado híbrido.^(5,6) Além disso, há de se considerar o possível efeito do reverso compressivo na ruptura de fibras fortalecedoras de vidro, orientadas na direção de carregamento (0°), as quais reconhecidamente exibem uma resistência relativamente pobre à compressão, tendendo, portanto, a fletir (flambar) e fraturar prematuramente, reduzindo assim a resistência cíclica do laminado híbrido como um todo. Ainda para um $R < 0$, não menos importante seria a questão da delaminação induzida por compressão axial (9), que contribui adicionalmente para a redução da rigidez do laminado híbrido, favorecendo sua flexão/flambagem e, portanto, auto-alimentando o mecanismo de fratura de fibras de reforço. Chamam à atenção na Tabela 1 o menor módulo de elasticidade em tração do Glare perante a liga-Al (diferença percentual de 18% em favor da liga 2024), assim como a relativamente baixa tensão em que o material híbrido passa a exibir um comportamento não-linear, ambos frutos certamente da estrutura laminar de Glare, com a presença de várias interfaces, associada à existência da resina epóxi com propriedades mecânicas pouco atrativas. É certo que tais características afetam negativamente em alguma extensão o desempenho de

Glare na presença de reversos compressivos em fadiga. Digno de nota é ainda o fato de que o módulo de elasticidade em compressão monotônica axial da liga-Al foi 87 GPa, contra apenas 59 GPa de Glare (32% em favor da liga monolítica),⁽¹⁰⁾ denotando novamente certa fragilidade do laminado à ação de esforços axiais compressivos.

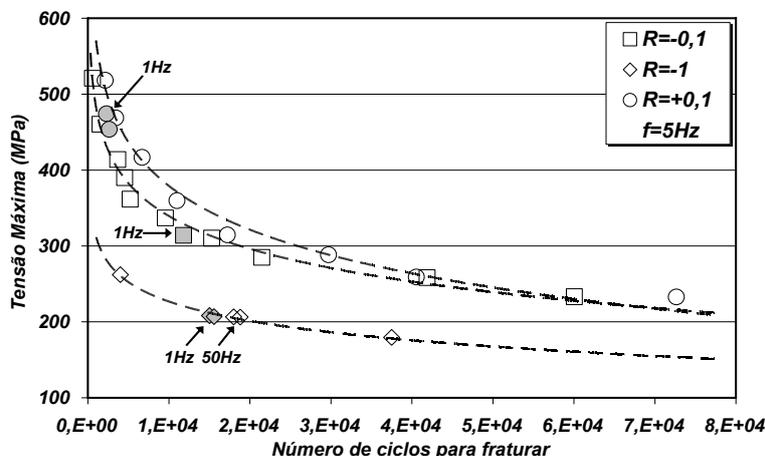


Figura 3. Curvas S-N do Glare-5. Ajuste logarítmico de dados.

Observa-se ainda na Figura 3, que, para maiores freqüências de carregamento, a vida em fadiga é invariavelmente mais longa. Este resultado é típico dos materiais metálicos imersos em ambiente corrosivos, pois uma maior freqüência de aplicação da carga cíclica implica num menor tempo global para o acesso do meio quimicamente agressivo à ponta da trinca. No entanto, no caso em questão, imaginava-se, *a priori*, que uma maior freqüência de carregamento levasse a menores vidas em fadiga, em face do possível aquecimento da resina epóxi (por intermédio de dissipação viscoelástica) e a conseqüente redução de sua resistência mecânica e, como resultado, do laminado como um todo. No entanto, os resultados obtidos no presente estudo suscitam a possibilidade de um mecanismo análogo àquele de corrosão sob fadiga em ligas metálicas estar atuando em Glare. Pode-se postular, por exemplo, que a delaminação entre camadas do material composto e/ou entre estas e as lâminas da liga metálica, originada por esforços mecânicos cíclicos, em especial na existência de reverso de compressão, exponha fibras de vidro à ação corrosiva do oxigênio presente no ambiente, o que degradaria suas propriedades mecânicas. Deste modo, freqüências mais elevadas restringiriam o tempo total de acesso do agente oxidante à fase fortalecedora, portanto retardando o processo de fratura do laminado.

Merece ser notado que, no caso de $R=-1$ (fadiga totalmente reversa), e sob uma freqüência de 1 Hz, a falha prematura das lâminas de alumínio por fratura (mostrada na Figura 4), impediu a continuidade do ensaio, visto que as fibras de vidro imersas na resina epóxi não suportaram o reverso compressivo, flambando excessivamente e não originando, portanto, a tensão compressiva necessária à continuidade do ensaio. Desta forma, neste caso, o critério originalmente assumido de falha por ruptura integral do espécime não pôde ser totalmente satisfeito.

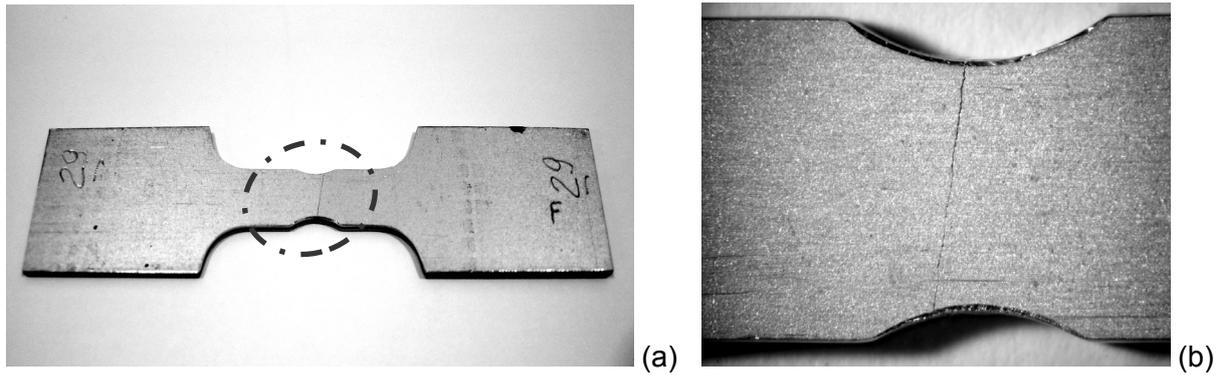


Figura 4. Corpo de prova de Glare-5 após falha por fratura prematura das lâminas da liga-Al (a), e detalhe do trincamento transversal (b).

Avaliando-se agora as curvas S-N da Figura 5, correspondente à liga de alumínio 2024-T3, nota-se que para $R < 0$ a vida em fadiga é também mais curta que para R positivo, exatamente como verificado para o Glare-5. Este fato corrobora em boa extensão a hipótese, já experimentalmente suportada em trabalhos prévios de outros autores,^(2,5,6) de que a fase metálica é que controla o estágio de iniciação de trincas de fadiga em Glare, o qual (estágio), por sua vez, é que determina em essência a vida total em fadiga (cuja parcela complementar é o estágio de propagação da trinca) nos experimentos de curvas S-N.

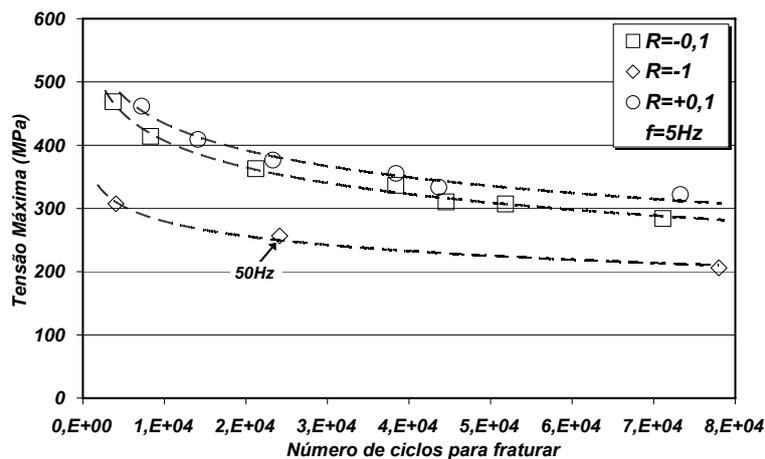


Figura 5. Curvas S-N da liga de alumínio 2024-T3. Ajuste logarítmico de dados.

Comparando-se desta feita as curvas S-N do Glare-5 às da liga-Al 2024-T3, observa-se na Figura 6 que a liga monolítica apresentou, para $R = -0,1$, ou seja, um carregamento apenas levemente alternado, um desempenho sensivelmente superior ao laminado metal-fibra. Por exemplo, para um nível de tensão máxima da ordem de 450 MPa, a vida em fadiga do Glare-5 corresponde à apenas metade da vida da liga-Al concorrente. A análise global das curvas mostra que, com o aumento do número de ciclos, o desempenho mecânico em fadiga do Glare-5 segue diminuindo em relação à liga-Al, sendo que, para uma tensão de 300 MPa, a vida em fadiga do Glare-5 corresponde a somente um terço daquela exibida pela liga 2024. O pior desempenho do LMF frente à liga-Al pode ser explicado com base em fatores previamente citados, tais como a baixa resistência das fibras de vidro à compressão, delaminações induzidas por compressão axial, as quais são também favorecidas pela relativamente baixa rigidez estrutural das lâminas metálicas de Glare, menor módulo de elasticidade deste frente à liga-Al (seja em tração e, principalmente, em

compressão), não-linearidade da relação tensão-deformação sob baixas tensões aplicadas, presença de múltiplas interfaces e de uma fase polimérica com baixas propriedades mecânicas.

Ensaio de compressão monotônica⁽¹⁰⁾ demonstraram uma levemente menor resistência mecânica de Glare-5 frente à liga 2024-T3, contrariamente ao comportamento determinado em tração monotônica (Tabela 1). Isto, de fato, reforça a suspeição de que os danos mais críticos em Glare devam ser introduzidos exatamente durante o reverso de compressão, e propagados ao longo do reverso subsequente de tração. Uma comparação mais cuidadosa entre as Figuras 3 e 5 realmente mostra uma maior susceptibilidade do Glare-5 à mudança da razão de carga R, para os mais elevados níveis de tensão máxima aplicada.

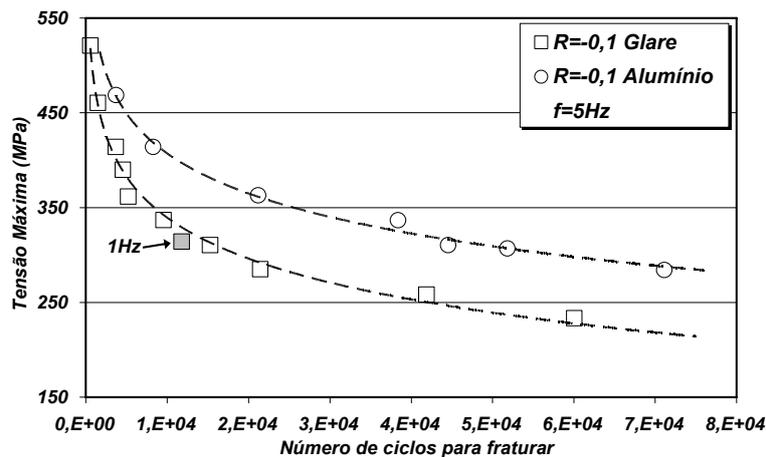


Figura 6. Curvas S-N (R=-0,1) do Glare e da liga-Al. Ajuste logarítmico de dados.

Nas curvas S-N apresentadas na Figura 7, obtidas sob R=+0,1, ou seja, num carregamento trativo levemente flutuante, observa-se a mesma tendência estabelecida para R negativo (tensão levemente alternada), com a diferenciação entre os desempenhos dos materiais aumentando progressivamente à medida em que evolui o número de ciclos. Isto ilustra cabalmente o caráter mais crítico do carregamento em fadiga na degradação das propriedades mecânicas de Glare-5, frente à liga-Al, já que, como mostram os dados da Tabela 1, o primeiro material desempenha sensivelmente melhor que o segundo sob um carregamento monotônico trativo. No caso da atuação exclusiva de tensões cíclicas trativas, as perdas de propriedades mecânicas de Glare por fadiga (vista ser ele mais resistente que a liga Al-2024 sob tração monotônica) possivelmente ocorram por ruptura progressiva de fibras de vidro, as quais possuem um módulo de elasticidade trativo compatível, e eventualmente até mesmo superior,⁽¹¹⁾ ao da liga-Al, sendo nelas que provavelmente se concentrem as cargas aplicadas em serviço. A fratura progressiva das fibras fortalecedoras, aliada à muito maior superfície metálica disponível para a nucleação de trincas no laminado metal-fibra,⁽⁵⁾ comparativamente à liga-Al monolítica (numa razão de 2:1 no caso em questão), enfraquece o Glare numa taxa mais rápida que o fazem os danos na liga concorrente (danos estes de natureza exclusivamente metalúrgica), resultando num pior desempenho global de Glare também nestas circunstâncias.

Uma palavra, no entanto, deve ser mencionada em defesa do LMF Glare-5. Há de ser lembrado que esta classe de Glare possui apenas duas camadas, de um total de quatro, de fibras de vidro orientadas na direção de carregamento principal (i.e., 0°, que coincide com a direção de laminação da liga-Al que compõem o laminado metal-

fibra). Como exemplos, podemos citar outras classes de Glare, como as 1 e 2, que possuem fibras orientadas unicamente na direção principal de carregamento, 0° ; por outro lado, as classes 3 e 4 de Glare possuem disposições biaxiais das fibras de vidro (i.e., 0° e 90° , assim como o Glare-5 ora avaliado), porém com o dobro da quantidade de fibras orientadas na direção 0° em relação à orientação 90° . Deste modo, conclui-se que Glare-5 possui, além de um pequeno número absoluto de camadas de fibras fortalecedoras (2), também um baixo percentual (50%) de camadas orientadas a 0° . De fato, a concepção de Glare-5 para otimização de propriedades de impacto foi bem enfatizada no presente texto. Também, nunca é demais insistir no fato de que, em experimentos de curvas S-N, é o estágio de iniciação de trincas (e de danos) que controla o processo global de fratura, o que é especialmente verdadeiro no caso de espécimes entalhados, quando o corte de fibras fortalecedoras tende a reduzir a resistência do material híbrido, e com ligamento estreito, tal como ensaiados neste estudo.

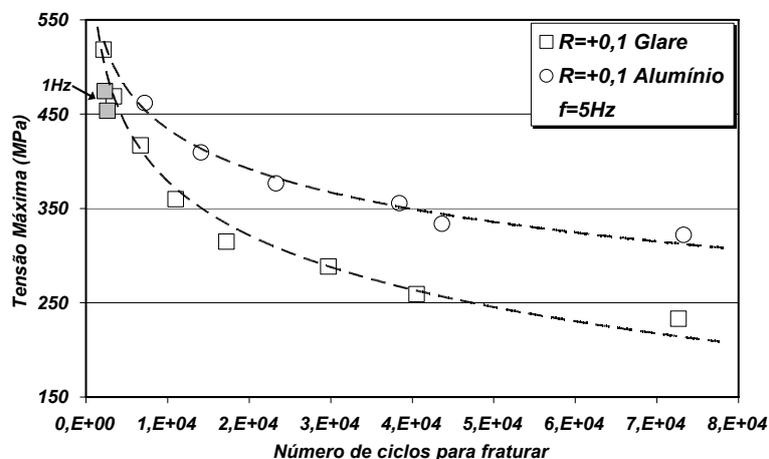


Figura 7. Curvas S-N ($R=+0,1$) do Glare e da liga-Al. Ajuste logarítmico de dados.

Com base nas curvas S-N apresentadas na Figura 8, onde a razão de tensão $R=-1$ (tensão completamente alternada), em ensaios essencialmente conduzidos sob uma frequência de 50 Hz, conclui-se que a diferença entre os desempenhos do Glare e da liga-Al é ainda maior em comparação aos dois casos anteriores. Por exemplo, analisando-se as curvas S-N na tensão de 300 MPa, nota-se que a vida em fadiga do Glare corresponde a um quarto da vida da liga de alumínio, enquanto este valor pode chegar até a uma fração de um quinto para uma tensão de 200 MPa. Certamente, os efeitos referidos nas análises relativas ao caso de $R=-0,1$ se façam sentir numa escala muito mais avassaladora sob $R=-1$, como decorrência dos mais elevados níveis de tensão compressiva desenvolvidos no laminado híbrido.

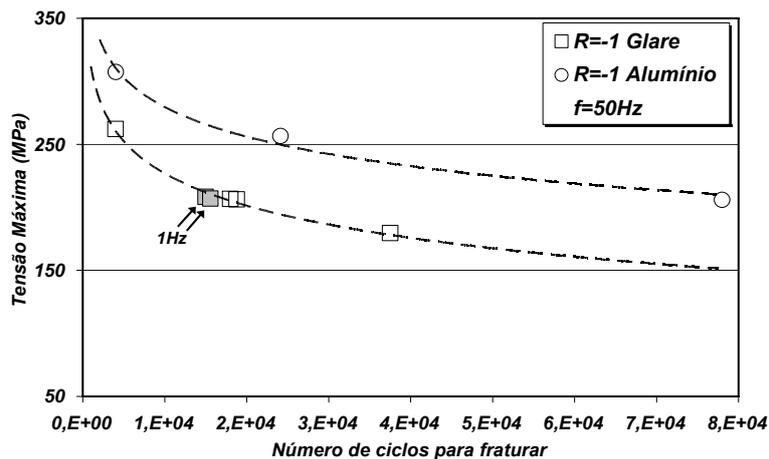


Figura 8. Curvas S-N (R=-1) do Glare e da liga-Al. Ajuste logarítmico de dados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir que o estágio de iniciação de trincamento sob fadiga de Glare-5 é consideravelmente mais acelerado que o da liga-Al monolítica 2024-T3 rival, sob quaisquer condições de carregamento aplicado, levando, portanto, a incertezas quanto ao seu desempenho em fadiga durante condições reais de aplicação em serviço. Possíveis razões para o baixo desempenho do laminado metal-fibra foram propostas, destacando-se: (i) para R=-0,1, preponderam a baixa resistência à compressão das fibras de vidro e a baixa rigidez estrutural da lâminas de liga-Al, favorecendo a ocorrência de delaminações; (ii) para R=+0,1, vigoram a ruptura progressiva das fibras fortalecedoras de vidro, onde se concentram preferencialmente as cargas aplicadas, e a extensiva nucleação de trincas na grande superfície metálica disponível no LMF; (iii) para R=-1, os fenômenos referidos em (ii) se manifestam de modo muito mais intenso. Não obstante a excelente resistência à propagação de trincas de Glare, trincas e danos correlatos de fadiga são facilmente introduzidos neste material, o que é uma característica especialmente negativa em condições reais de operação em serviço quando se considera um quadro de danos múltiplos simultâneos (MSD). Os resultados indicam a existência de um eterno compromisso entre as resistências, respectivamente, à iniciação e ao crescimento de trincas (danos) de fadiga dos materiais ensaiados. Se, por um lado, Glare apresenta uma pobre resistência à introdução do dano inicial, a liga de alumínio concorrente exhibe, por sua vez, uma resistência substancialmente superior, porém às expensas de sua resistência à propagação de trinca, ocasião em que Glare atinge seu máximo desempenho, como fartamente documenta a literatura (estranhamente só para R>0). Isto de certa forma corrobora alguns resultados experimentais⁽⁵⁾ que demonstraram que, em Glare, raios de curvaturas mais suaves induzem a nucleação imediata de diversas trincas de fadiga, que se propagam de modo apenas incipiente; por outro lado, em entalhes mais agudos foi notado que poucas trincas se iniciam no concentrador, porém elas propagam-se rapidamente.

Agradecimentos

À FIPAI pelo suporte financeiro provido na forma de bolsa de estudos de C.E.G.C., e à Embraer S/A pelo fornecimento da liga de alumínio 2024 e usinagem parcial de Glare-5.

REFERÊNCIAS

- 1 Vlot, A., *Towards application of fibre metal laminates in large aircraft*, J. Reinf. Plast. Compos., v.14, p.1150-59, 1995.
- 2 Alderliesten, R.C, *Fatigue and damage tolerance of Glare*, Int. J. Fat., v.23, p.877-85, 2001.
- 3 Shim, D.J., *Fatigue crack growth prediction in Glare hybrid laminates*, J. Mater. Sci., v.27, p.2458-62, 1992.
- 4 Gregory, M.A., *Fiber-metal laminates: solution to weight, strength and fatigue problems*, 30th Annual Conference of Metallurgists, Metallurgical Society of CIM, Canada, 1991.
- 5 Vasek, A., *Fatigue crack initiation in fibre-metal laminate Glare 2*, Mater. Sci. Engng, v.234-236, p.621-4, 1997.
- 6 Senatorova, O.G., *Features of Al laminate behavior at fatigue loading*, Mater. Sci. Forum, v.217, p.1745-9, 1996.
- 7 Tarpani, J.R., *Fatigue in riveted lap joints of fiber-metal laminate Glare*, 9th International Fatigue Congress, USA, 2006.
- 8 ASTM Standards, Section 3, v. 03.01, Designation E606-96, *Standard practice for strain-controlled fatigue testing*, American Society for Materials Testing, 1998.
- 9 Remmers, J.J.C., *Delamination buckling of fibre-metal laminates*, Comp. Sci. Tech., v.61, p.2207-13, 2001.
- 10 Castro, C.E.G., *Fadiga de baixo-ciclo em laminado híbrido Glare*, Trabalho de Iniciação Científica, Escola de Engenharia de São Carlos, 2005.
- 11 Askeland, D.R., *The Science and Engineering of Materials*, 3rd Ed., PWS Publ. Co., 1994.