



AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DE COMPÓSITOS LAMINADOS DE ALUMÍNIO COM RESINA EPÓXI REFORÇADA POR FIBRAS DE VIDRO

Otavio Henrique Paiva Martins Fontes

Fernando Luiz Bastian

COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Materiais Compósitos. Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Caixa Postal 68505, CEP.: 21945-970, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

***Resumo.** Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento em tração de compósitos laminados de alumínio com resina epóxi reforçada por fibras de vidro. A partir dos resultados obtidos nos ensaios, determinou-se as propriedades mecânicas do compósito, ou seja, módulo de elasticidade, tensão de escoamento e tensão de ruptura. Os resultados obtidos no ensaio de tração do compósito foram comparados aos valores do compósito Glare 3 3/2 (fornecidos pelo fabricante), material que apresenta similaridade ao compósito aqui fabricado, uma vez que possui as fibras dispostas proporcionalmente nas direções longitudinal e transversal. Além disso, foram calculadas as propriedades específicas dos dois materiais. Os resultados obtidos mostraram que o compósito desenvolvido no Laboratório apresentou uma resistência a tração inferior ao compósito Glare 3 3/2. Por outro lado, os resultados mostraram um aumento significativo das propriedades específicas do compósito desenvolvido no Laboratório em comparação ao alumínio comercial utilizado em sua fabricação.*

***Palavras-chave:** compósitos, laminados, tração, propriedades específicas.*

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de desenvolver-se materiais com requisitos de propriedades e desempenho em serviço cada vez maiores possibilitou, no início dos anos 80, o desenvolvimento de uma nova classe de materiais compósitos, conhecida como materiais híbridos, e que tem como principais representantes o Arall (Aramid Reinforced Aluminum Laminated) e o Glare (Glass Reinforced Aluminum Laminated). Estes materiais foram desenvolvidos com o intuito de substituir as ligas de alumínio utilizadas na indústria aeronáutica. A Universidade de Delft na Holanda em conjunto com a Fokker Aircraft, deram início às pesquisas desta nova classe de compósitos, que culminou em 1991 no início da comercialização destes materiais com às designações acima citadas. De acordo com Wu et al. (1994) e Slagter (1994), as principais propriedades destes materiais são: maior resistência à fadiga, maior limite de resistência à tração, maior limite de escoamento, redução em torno de 15% a 20% na densidade, maior economia nos custos de operação através de maiores períodos de inspeção e manutenção.

Segundo Wu (1994), Marissen (1981) e Ritchie et al. (1989), a melhora acentuada na resistência à fadiga destes compósitos ocorre fundamentalmente devido à grande capacidade que estes materiais possuem de impedir e bloquear o avanço de trincas de fadiga. A partir do momento que uma trinca de fadiga começa a se propagar em uma camada de alumínio, ocorre um processo de delaminação entre as interfaces, no caso fibra-resina e metal, tendendo a ocorrer acomodação e uma redistribuição de tensões internas. À medida que o processo avança, o bloqueio devido às fibras permitirá uma diminuição no avanço da trinca, ocorrendo uma constrição na ponta da mesma. De uma forma geral, o desempenho de um compósito laminado depende fundamentalmente de fatores como adesão entre a resina (polímero) e a liga metálica, a metodologia de fabricação e as características e propriedades dos materiais constituintes.

Neste trabalho são apresentados os resultados dos ensaios de tração dos compósitos laminados fabricados no Laboratório de Materiais Compósitos da COPPE, determinando-se as tensões de escoamento e ruptura, além de determinar de forma aproximada o módulo de elasticidade do compósito. Os resultados foram comparadas aos valores fornecidos pelo fabricante do Glare 3 3/2, uma vez que este material apresenta uma configuração similar ao compósito desenvolvido. Também foram determinadas as propriedades específicas desses dois materiais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os seguintes materiais foram utilizados na fabricação do compósito, sendo todos obtidos junto ao mercado nacional: alumínio comercial, tecido de fibra de vidro e resina epóxi.

A matriz foi formada pela resina Araldite GY 260 da Ciba-Geigy, que apresenta as seguintes características: bifuncional, líquida à temperatura ambiente e com estrutura básica de diglicidil éter do bisfenol A, viscosidade a 25°C de 12000-16000 mPas, teor epóxi de 5,20 Eq/kg - 5,40 Eq/kg e peso específico de 1,15 g/cm³; e pelo endurecedor HY 951 também da Ciba-Geigy. O endurecedor HY 951 é um líquido composto pela amina alifática hexafuncional trietileno tetramina TETA, com uma viscosidade a 25°C \leq 30mPas e um peso específico de 0,97 g/cm³. Este sistema é de cura a frio, sendo normalmente empregado em matrizes de compósitos reforçados por fibras, podendo ser fabricado por processo manual ou por pistola.

A liga metálica utilizada foi alumínio comercial na forma de folhas com espessura de 0,3 mm. Fez-se necessária uma análise química do alumínio, cujos elementos estão apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Composição química do alumínio comercial utilizado.

Fe	Cu	Mn	Zn	Mg	Al
0,5000%	0,0100%	0,0080%	0,0450%	0,0015	99,4355%

Utilizou-se um tecido de fibra de vidro com gramatura de 326g/m². O tecido possuía as fibras distribuídas de forma homogênea e perpendicular, nas direções longitudinal e perpendicular.

O compósito laminado foi fabricado no lay-up 3/2, ou seja, três camadas de alumínio com duas de fibra impregnada (resina epóxi impregnada com fibra de vidro). Este laminado fabricado no Laboratório, apresentou uma espessura final de 1,90 mm. A figura 1 apresenta esquematicamente o compósito :

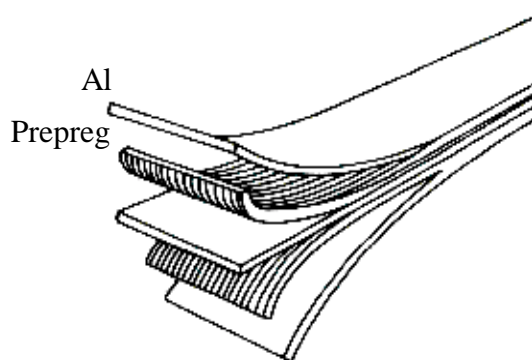


Figura 1 -“Lay-up” esquemático do compósito laminado e do Glare 3 3/2.

O compósito Glare 3 3/2 foi utilizado como parâmetro de comparação com o compósito ora fabricado. Este material possui a seguinte constituição de acordo com dados fornecidos pelo seu fabricante:

- (i) Liga 2024-T3;
- (ii) Prepreg de cura a quente à 120°C;
- (iii) 50% de fibras na direção longitudinal e 50% na direção transversal;
- (iv) Resina epóxi.
- (v) Espessura final de 1,42 mm.

Uma sucinta explicação dos procedimentos experimentais adotados na fabricação do compósito é apresentada por Fontes (1997).

Ensaio de tração

Os corpos de prova utilizados para o ensaio de tração, inicialmente seguiam a norma ASTM D3039-93 (1990), de acordo com a figura 2:

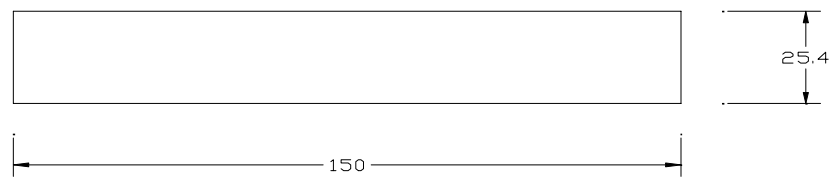


Figura 2 - Corpo de prova inicial, segundo a ASTM D3039-M para materiais compósitos.

Devido a problemas ocorridos com este corpo de prova, optou-se por corpos de prova com a geometria descrita por Ajdelsztajn (1996) conforme mostra a figura 3:

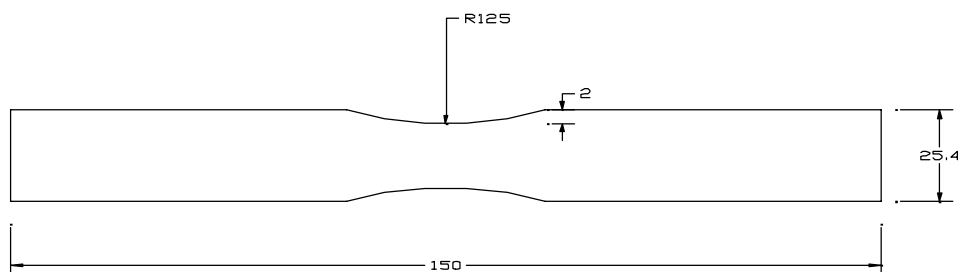


Figura 3 - Corpo de prova de tração utilizado nos ensaios.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina Instron TL1125, nas seguintes condições:

- velocidade do travessão da máquina: 0,5 mm/min.;
- velocidade do papel: 20 mm/min.;
- temperatura ambiente: 25° C.

Foram ensaiados 03 (três) corpos de prova, e a partir dos ensaios realizados foram obtidos valores para limite de escoamento (σ_e) e limite de ruptura (σ_r) do compósito. Não foi possível determinar a deformação dos corpos de prova ($\epsilon = \Delta l / l$), uma vez que ocorreu delaminação em todos os corpos de prova em um momento anterior à carga máxima. Também calculou-se a densidade do compósito, visando a determinação da resistência específica do mesmo. Além disso, realizaram-se ensaios com intuito de determinar as propriedades do alumínio comercial, nas direções longitudinal e transversal, utilizando corpo de prova de acordo com ASTM B557 M-84 (1989), como apresentado na figura 4:

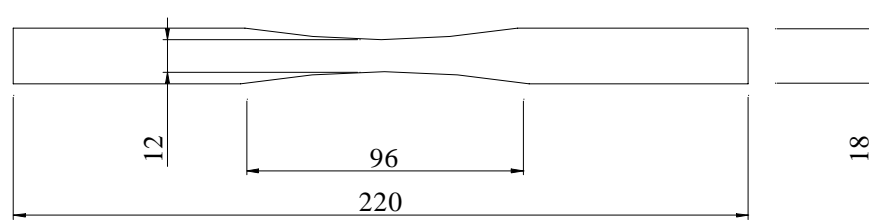


Figura 4 - Corpo de prova do alumínio comercial.

As mesmas condições de ensaio descritas acima para o compósito foram utilizadas para o alumínio.

As propriedades em tração do Glare 3 3/2 foram fornecidas pelo fabricante.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no ensaio de tração do compósito fabricado, e do Glare 3 3/2:

Tabela 2 - Resultados do ensaio de tração do compósito fabricado no Laboratório e do Glare 3 3/2. Propriedades fornecidas pelo fabricante*.

Material	σ_{esc} (MPa)	σ_{rup} (MPa)	E (GPa)
Compósito	105,90	265,50	50,70
Glare 3 3/2*	303,00	745,00	58,00

A Tabela 2 mostra resultados inferiores para limite de escoamento e ruptura do compósito fabricado em relação ao Glare 3 3/2. Durante os ensaios de tração, percebeu-se que a fratura do compósito fabricado ocorreu sempre de forma diferente ao esperado para um material compósito, ou seja, sem comprometimento entre os seus constituintes. O alumínio apresentou característica inerente ao seu comportamento (fratura dúctil) enquanto que o conjunto fibra de vidro/resina epóxi apresentou característica própria. De acordo Slagter (1994), este tipo de comportamento difere consideravelmente de materiais como o Arall e o Glare. Nestes materiais existe um grande comprometimento entre os seus constituintes, o que garante um comportamento único da estrutura. O comportamento do compósito foi o de uma estrutura única, até um momento anterior a carga máxima. Neste instante, percebeu-se um “estampido” característico do processo de ruptura das fibras, em conjunto com a delaminação. Após a carga máxima, o processo de fratura dividiu-se em dois, pois o material (alumínio) continuou a deformar-se. O processo de delaminação resultou da fraca adesão entre o polímero e o alumínio. Esta diferença ficou evidente se levarmos em consideração os valores de resistência dos materiais constituintes, principalmente em relação ao alumínio comercial e a

liga 2024. A Tabela 3 mostra os valores obtidos para o alumínio comercial e para a liga 2024-T3:

Tabela 3 - Resultados do ensaio de tração para o alumínio comercial e para a liga 2024-T3. As letras L e T representam as direções longitudinal e transversal de laminação do alumínio.

Material	σ_e (MPa)	σ_r (MPa)	σ_{max} (MPa)
Al comercial (L)	106,40	84,30	118,70
Liga 2024 (L)	359,00	455,00	-----
Al comercial (T)	102,70	78,50	116,30
Liga 2024 (T)	324,00	448,00	-----

A partir das propriedades dos materiais constituintes do compósito fabricado, com a utilização da Regra das Misturas, foi possível determinar de forma aproximada o módulo de elasticidade do compósito. Para o compósito estudado, a Regra deve ser aplicada da seguinte forma:

$$E_C = E_M \times v_M + E_{Al} \times v_{Al} \quad (1)$$

$$E_M = E_E \times v_E + E_F \times v_F \quad (2)$$

As incógnitas das Eq. 1 e 2 são abaixo apresentadas:

E_C - módulo de elasticidade do compósito;

E_M - módulo de elasticidade do sistema prepreg formado pela fibra e resina;

E_F - módulo de elasticidade da fibra de vidro;

E_E - módulo de elasticidade da resina epóxi;

v_F - fração volumétrica das fibras de vidro;

v_E - fração volumétrica de resina epóxi;

v_{Al} - fração volumétrica de alumínio;

$v_{Prepreg} = v_M$ - fração volumétrica do sistema prepreg.

Apresenta-se abaixo os módulos de elasticidade dos diferentes materiais e suas respectivas frações volumétricas:

$$E_F = 72,0 \text{ GPa}$$

$$E_E = 6,9 \text{ GPa}$$

$$E_{Al} = 70,0 \text{ GPa}$$

$$v_F = 0,40$$

$$v_E = 0,60$$

$$v_{Al} = 0,48$$

$$v_{Prepreg} = v_M = 0,52$$

Ao substituímos todos os valores acima mostrados, encontramos para o módulo de elasticidade do compósito 50,70 GPa, como apresentado na Tabela 2. O compósito Glare 3 3/2 apresenta um módulo de elasticidade de 58,00 GPa (valor este válido tanto para a direção longitudinal -L- quanto transversal -T-).

A Tabela 4 mostra os valores de densidade do compósito fabricado e do Glare, utilizados para cálculo da resistência específica:

Tabela 4 - Valores de densidade (ρ) do compósito, do alumínio comercial, do Glare 3 3/2 e da liga 2024-T3.

Material	Densidade (g/cm^3)
Compósito	2,118
Al comercial	2,700
Glare 3 3/2	2,520
Liga 2024-T3	2,780

Os valores de resistência específica do compósito do compósito Glare 3 3/2, do alumínio comercial e da liga 2024 são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 - Valores de limites de resistência específica do compósito, Al comercial, Glare 3 3/2 e da liga 2024-T3.

Material	σ_e / ρ	σ_r / ρ
Compósito	50,00	125,35
Al comercial	39,41	29,07
Glare 3 3/2	120,24	295,63
Liga 2024 (L)	129,14	163,67

A Tabela 5 apresentou valores de resistência específica, mostrando que o compósito fabricado obteve-se um aumento significativo do limite de resistência à ruptura específico do compósito em relação ao alumínio. Este maior valor de resistência específica justifica-se fundamentalmente pela maior rigidez do compósito (devido a sua maior espessura), e também pelo fato deste apresentar uma densidade bem menor que o alumínio ($2,118 \text{ g/cm}^3$ contra $2,700 \text{ g/cm}^3$).

Em relação a resistência específica ao escoamento do compósito, obteve-se de uma diferença menor em virtude das baixas propriedades mecânicas do alumínio.

No caso do Glare 3 3/2, obteve-se um aumento significativo do limite de resistência a ruptura específico tanto na direção longitudinal quanto na transversal, em relação ao limite de resistência à ruptura específico da liga 2024-T3. O compósito fabricado apresentou uma resistência específica superior ao alumínio comercial, porém, em comparação ao Glare 3 3/2 apresentou uma menor resistência específica, principalmente em virtude das baixas propriedades mecânicas de seus constituintes.

4. CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos nos ensaios de tração, mostraram que o compósito fabricado apresentou resistência mecânica inferior ao Glare 3 3/2, em virtude principalmente das baixas propriedades mecânicas de seus constituintes e do processo de fabricação. É de fundamental importância o aprimoramento das condições de fabricação, buscando-se assim uma maior efetividade do processo químico de adesão, característica essencial para um bom desempenho desses materiais. Na medida em que se conseguir melhorar o processo de adesão entre os diferentes materiais constituintes, somando-se a isto o fato de serem utilizados materiais com elevado desempenho, compósitos com excelentes propriedades mecânicas serão obtidos.

Os resultados também mostraram um significativo aumento do limite de resistência à ruptura específico do compósito em relação ao alumínio comercial com o qual foram fabricados, sendo este aumento superior ao obtido para o Glare 3 3/2 quando comparado a liga de alumínio 2024-T3. Este fato justifica-se pela maior rigidez do compósito fabricado (maior espessura), e pelo fato de possuir uma densidade menor que o alumínio comercial.

Agradecimentos

Ao CNPQ, CAPES e FINEP pelo apoio financeiro ao projeto.

A CAPES pela bolsa de Mestrado concedida a Otavio Henrique Paiva Martins Fontes.

Ao Centro Técnico Aeroespacial (CTA) em São José dos Campos, pela colaboração e ajuda.

REFERÊNCIAS

- Ajdelsztajn, L., Amêndola, M.S., Sampaio, E.M., Bastian, F.L., 1996, Estudo da geometria de corpos de prova de tração para ensaios em compósitos laminados, Congresso Brasileiro de Ciências dos Materiais, pp. 1504-1507.
- B 557M-84, 1989, Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum and Magnesium Alloy Product, Metals-Mechanical Testing Elevated and Low-Temperature Tests Metallography, Annual Book of ASTM Standard, v.03.01.
- D-3039M - 93, 1990, Standard Method for Tensile Properties of Fibre-Resin Composite, ASTM - Standard and Reference for Composites, 2 ed, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- FONTES, O.H.P.M., 1997, Fabricação e Caracterização de Compósitos Laminados de Alumínio com Resina Epóxi Reforçados por Fibras de Vidro. Tese de M.Sc., UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL.
- MARISSSEN, R., VOGELANG, L.B., 1981, Presented at the International SAMPE Meeting, Cannes.
- MARISSSEN, R., VOGELANG, L.B., SCHIJVE, J., 1981, In "The eleven ICAF Symposium Noordwijkerhat", The Netherlands.
- RITCHIE, R.O., YU, W., BUCCI, R.J., 1989, Engineering Fracture Mechanics, v.3, n.32, pp. 381.
- SLAGTER, W.J., WU, H.F., WU, L.L., 1994, An Investigation on the bearing test procedure for fibre-reinforced aluminium laminates, Journal of Materials Science, v.29, pp. 4592-4603.
- WU, H.F., WU, L.L., 1994, Mil-HDBK Design Allowables for fibre-metal laminates: Arall-2 and Arall-3, Journal of Materials Science Letters, v.13, pp.582-585.

TENSION RESISTANCE OF LAMINATED COMPOSITE OF ALUMINUM WITH EPOXY RESIN REINFORCED BY GLASS FIBERS

***Abstract.** This work studied the behavior in strength of laminated composite of aluminum with epoxy resin reinforced by glass fibers. The results obtained showing the mechanical properties of composite development like young modulus, yield strength and rupture strength. The results from the composite tensile test were compared with composite Glare 3 3/2 values, due to this material is similar to composite fabricated in this work, so the composite Glare has position fibers dispersed equality in longitudinal and transversal direction. The specific properties from the both material were calculated. The results have shown that composite development in the lab, showed a tensile resistance lower than composite Glare 3 3/2. By the way, the results had a significativy high of the specific properties composite produced in the lab comparing with commercial aluminum used.*

***Key-words.** composite, laminated, tension, specific properties*