

## **AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FRATURA 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.** Com o intuito de estudar a tenacidade de compósitos laminados de alumínio comercial com resina epóxi reforçada por fibra de vidro, material desenvolvido no Laboratório de Materiais Compósitos da COPPE-UFRJ, utilizou-se o Ensaio de Kaufman, desenvolvido para chapas de alumínio, o qual permite avaliar a resistência a propagação de trincas nestes materiais. Os resultados apresentaram um valor de resistência ao rasgamento do material, obtida através de um gráfico plotado no ensaio, onde é possível determinar a energia necessária para iniciar a trinca no corpo de prova e a energia necessária para propagar a trinca até a falha completa, sendo que neste trabalho foi obtida a primeira. Os valores obtidos no ensaio mecânico foram comparados aos valores obtidos para o compósito Glare 1 3/2, material este já comercializado, e que possui características similares ao compósito fabricado no Laboratório. Os resultados mostraram que o compósito laminado fabricado em laboratório apresentou resistência a fratura inferior ao compósito Glare 1 3/2.*

***Palavras-chave:** fratura, tenacidade, compósitos laminados.*

## 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 dessa nova classe de compósitos, que culminou em 1991 no início da comercialização destes materiais com as 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 apresentam-se os resultados obtidos do estudo da tenacidade de materiais compósitos laminados de alumínio comercial com resina epóxi reforçadas por tecido de fibra de vidro, material este fabricado no Laboratório de Materiais Compósitos da COPPE/UFRJ. Baseado no Ensaio de Kaufman (1964), fundamentado este nos estudos de Kahn (1958), o ensaio foi inicialmente desenvolvido para chapas de alumínio, o qual permite avaliar a resistência a propagação de trincas nestes materiais. Os resultados do ensaio de Kaufman mostram um valor de energia necessária para iniciar a trinca no corpo de prova e a energia necessária para propagar a trinca até a falha completa. Assim sendo, determinou-se para o compósito a energia necessária para iniciar a trinca no corpo de prova. Além disso, a partir dos resultados obtidos e da geometria do corpo de prova, foi possível determinar uma tensão de rasgamento do material, combinação de tensões normais e fletoras desenvolvidas durante o ensaio. Os valores obtidos no ensaio mecânico foram comparados aos valores obtidos para o compósito Glare 1 3/2, material este já comercializado, e que possui características similares ao compósito fabricado no laboratório.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os seguintes materiais foram utilizados na fabricação do compósito, sendo que todos foram 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/cm<sup>3</sup>; 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 ≤ 30mPas e um peso específico de 0,97 g/cm<sup>3</sup>. 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/m<sup>2</sup>. O tecido possuía as fibras distribuídas proporcionalmente nas direções longitudinal e perpendicular.

O compósito laminado foi fabricado na forma de placas, apresentando dimensões de 210 mm x 300 mm. A configuração foi a 3/2, formada por três camadas de alumínio com duas de tecido de fibra de vidro (resina epóxi impregnada com fibra de vidro). Este laminado fabricado no Laboratório, apresentou uma espessura final de 0,00190 m.

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

O compósito Glare 1 3/2, utilizado como parâmetro de comparação com o compósito ora fabricado, no presente trabalho:

- (i) Liga 2024-T3;
- (ii) Prepreg de cura a quente à 120°C;
- (iii) Fibras de vidro dispostas unidirecionalmente;
- (iv) Resina epóxi.
- (v) Espessura final de 0,00142 m.

A figura 1 apresenta de forma esquemática estes compósitos:

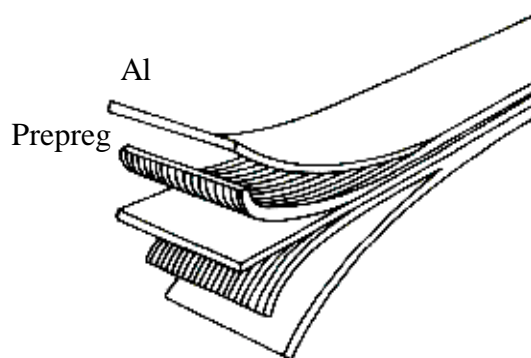


Figura 1 -“Lay-up” esquemático do compósito laminado e do Glare 1 3/2.

O ensaio de Kaufman foi realizado em uma máquina Instron modelo TL 1125, até a fratura completa do corpo de prova. O entalhe do corpo de prova feito com uma fresa do tipo HSS 21/2" x 1/2" x 60. As áreas obtidas no ensaio foram calculadas por intermédio de um planímetro Koizumi tipo KP-27. Foram realizados três ensaios para cada configuração do compósito fabricado no laboratório nas direções L e LT, e para o Glare 1 3/2 também nas direções L e LT, onde: L representa a direção de propagação da trinca coincidente com a direção das fibras; e LT representa a direção de propagação da trinca perpendicular a direção das fibras. A figura 2 mostra o corpo de prova utilizado no ensaio de Kaufman:

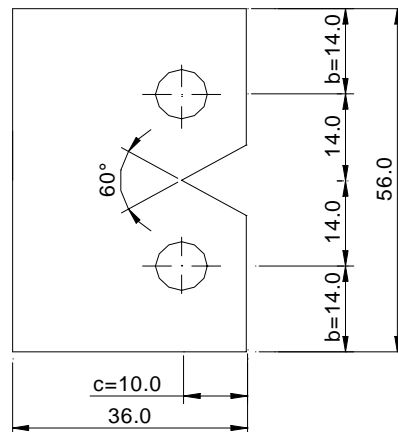


Figura 2 - Corpo de prova de Kaufman.

O ensaio de Kaufman permite determinar a energia necessária a fratura do corpo de prova. Através da curva carga x deslocamento foi possível encontrar a área sob a curva, que representa a energia necessária para levar o corpo de prova a fratura. A curva obtida no ensaio divide-se em duas partes, na qual a primeira representa a energia necessária para iniciar a trinca. A partir do momento em que se extrapola a carga máxima no ensaio a área sob a curva representa a energia necessária para propagar a trinca até a fratura completa do corpo de prova. Em nosso caso, apenas a energia necessária para iniciar a trinca foi determinada, uma vez que não ocorreu deformação plástica no compósito, haja vista a carga máxima atingida ter coincido com a carga de ruptura do compósito. A figura 3 mostra de forma esquemática o gráfico carga x deslocamento obtido no ensaio de Kaufman:

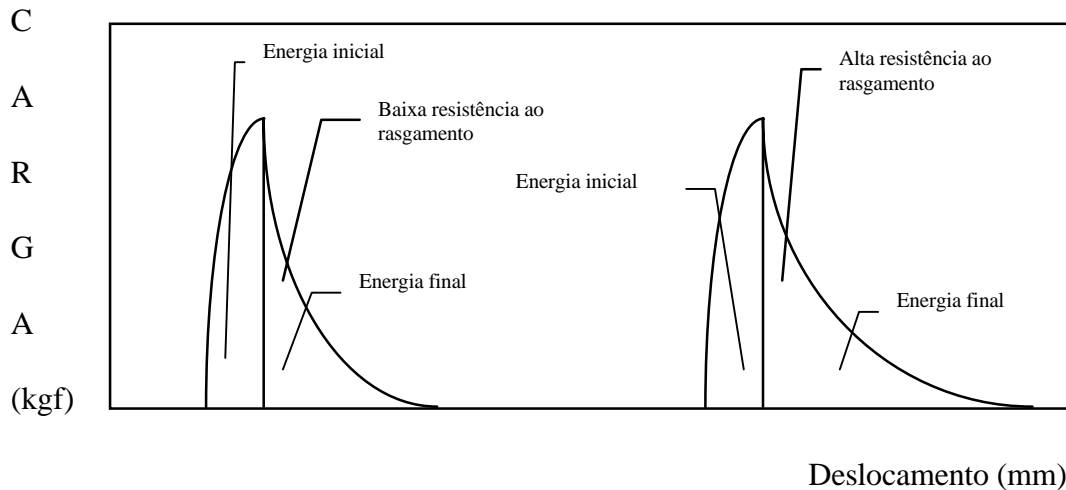


Figura 3 - Curvas características carga (kgf) x deslocamento (mm), segundo Kaufman (1964).

Além do cálculo da energia necessária a fratura e do valor da carga máxima obtida no ensaio, foi possível determinar a tensão de rasgamento do material ( $\tau$ ), através da seguinte fórmula:

$$\tau = S_t = \frac{P}{A} + \frac{Mc}{I} = \frac{P}{bt} + \frac{3P}{bt} = \frac{4P}{bt} \quad (1)$$

Onde: P = carga máxima em kgf.  
A = área da seção transversal frontal ao entalhe = b x t.  
M = momento fletor  
c = distância ao eixo neutro.  
I = momento de inércia em relação ao eixo neutro.  
b = largura da extremidade ao furo.  
t = espessura do corpo de prova.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados três ensaios para as condições propostas. A tabela 2 apresenta os resultados obtidos no ensaio de Kaufman: carga máxima (N), energia (J), tensão de rasgamento (MPa), sendo que a figura 4 apresenta um gráfico comparativo mostrando a variação da carga máxima com a configuração do corpo de prova. Além disso, são mostrados também os valores de espessura das diferentes configurações.

No início dos ensaios os corpos de prova de Kaufman apresentaram uma tendência de romperem nos furos. Isto ocorreu devido ao fato do alumínio comercial utilizado ser de baixa resistência mecânica. A solução encontrada para resolver tal problema foi a de colocar quatro pequenas chapas de aço, sendo duas de cada lado, fixadas todas as quatro por rebites. Desta forma conseguiu-se solucionar o problema, tomando-se o cuidado de não se colocar os rebites muito próximos dos furos e do entalhe, evitando uma concentração de tensões indesejável.

Tabela 2 - Resultados do Ensaio de Kaufman.

| Materiais    | P máx. (N) | Energia (J) | $\tau$ (MPa) | Espessura (m) |
|--------------|------------|-------------|--------------|---------------|
| Compósito    | 2854,74    | 0,036       | 600,99       | 0,00190       |
| Glare 3/2 L  | 3087,00    | 0,1         | 869,57       | 0,00142       |
| Glare 3/2 LT | 5275,34    | 0,22        | 1485,00      | 0,00142       |

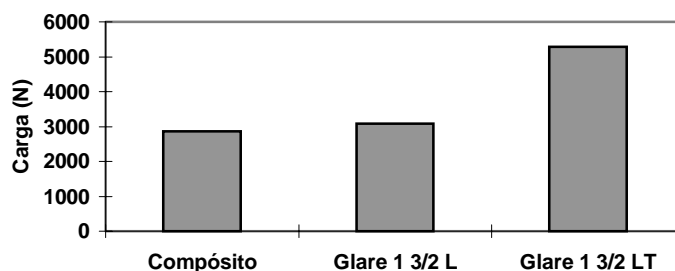


Figura 4 - Gráfico comparativo carga máxima x configuração. Dados obtidos do ensaio de Kaufman.

Percebe-se no gráfico acima que o compósito Glare 1 3/2 LT teve um valor de carga máxima maior que as demais configurações. Esta maior carga máxima culminou num maior valor para a tensão de rasgamento como mostra a figura 5:

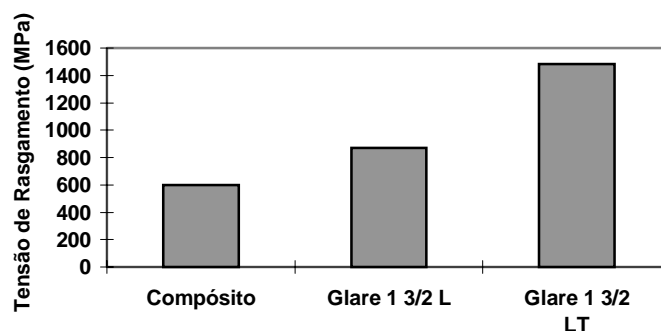


Figura 5 - Gráfico comparativo Tensão de rasgamento x configuração. Dados obtidos do ensaio de Kaufman.

O Glare 1 3/2 LT apresentou o maior valor de energia inicial necessária para iniciar a trinca, uma vez que foi necessário um maior dispêndio de energia devido a trinca se iniciar em uma direção transversal as fibras. Para o compósito fabricado no laboratório não houve diferença na direção da propagação das trincas em relação às fibras, em função da baixa resistência mecânica do alumínio utilizado. O ensaio de Kaufman permitiu apenas a determinação da energia necessária para iniciar a trinca, uma vez que para os compósitos a carga máxima coincidiu com a carga de ruptura do material no ensaio. A partir do momento em que atingiu-se a carga máxima, a estrutura deixou de comportar-se de forma

única. A figura 6 apresenta um gráfico comparativo entre os diferentes materiais e a energia necessária para iniciar a trinca:

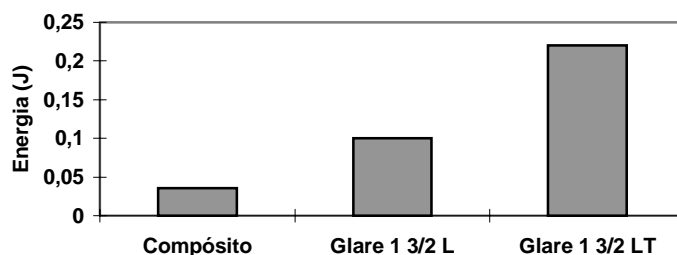


Figura 6 - Gráfico comparativo Energia inicial x configuração. Dados obtidos do ensaio de Kaufman.

O compósito fabricado no presente trabalho apresentou um desempenho mecânico inferior ao Glare, exibindo entretanto características próprias e valores de resistência considerados satisfatórios. Atribui-se como causas principais ao desempenho inferior o processo de fabricação, causando baixa adesão, além da utilização de materiais que apresentaram qualidade inferior

devido as inúmeras dificuldades observadas em seu processo de fabricação: baixa adesão, utilização de alumínio comercial com baixa resistência mecânica, utilização de resina epóxi de cura a frio, tecido de fibra de vidro de baixa qualidade, umidade e temperatura do local de fabricação, e demais variáveis da fabricação descritas anteriormente e citada por Fontes (1997).

#### 4. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi estudar a resistência a fratura de compósitos laminados de alumínio comercial com resina epóxi reforçados por fibras de vidro, através do ensaio de Kaufman. Os resultados obtidos mostraram que o compósito fabricado no Laboratório apresentou um valor razoável de energia necessária para se iniciar a trinca no corpo de prova quando comparado ao Glare 1 3/2. Este desempenho inferior justifica-se pelo fato dos os materiais constituintes do Glare 1 3/2 possuíam resistência mecânica superior aos materiais utilizados no compósito fabricado. Além disso, o Glare 1 3/2 possui uma metodologia de fabricação altamente sofisticada em relação ao compósito fabricado.

Em relação a tensão de rasgamento e a carga máxima obtida no ensaio, ocorreu a mesma tendência. O compósito fabricado apresentou um valor inferior ao Glare 1 3/2, caracterizando assim uma menor resistência a fratura.

#### *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 Tecnológico da Aeronáutica (CTA) em São José dos Campos, pela colaboração e ajuda.

## REFERÊNCIAS

- 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.
- KAHN, N.A., IMBEMBO, E.A., April 1958, A method for evaluating transition from shear to cleavage failure in ship plate and it's correlation with large scale plate test, The Welding Journal, v.27, n.4, pp. 169s.
- KAUFMAN, J.G., KNOLL, A.M., April 1964, Kahn-Type Tests and Crack Toughness of Aluminum Alloy Sheet, The Welding Journal, v.32, n.4, pp. 151-155.
- MARISSSEN, R., VOGELANG, L.B., January 1981, Presented at the International SAMPE Meeting, Cannes.
- MARISSSEN, R., VOGELANG, L.B., SCHIJVE, J., May 1981, In The eleven ICAF Symposium Noordwijkerhat, The Netherlands.
- RITCHIE, R.O., YU, W., BUCCI, R.J., 1989, Engineering Fracture Mechanic, 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.



## **RESISTANCE FRACTURE OF LAMINATED COMPOSITE OF ALUMINUM WITH EPOXY RESIN REINFORCED BY GLASS FIBERS**

***Abstract.** This work studied the toughness of laminated composite of commercial aluminum with epoxy resin reinforced by glass fibers, development in the Composite Material Laboratory of COPPE-UFRJ, using Kaufman Test, purpose to aluminum plate, to allow the resistance crack propagation in this materials. The results showed a value of tear strength of the material, obtained by a graphic of the test, where it was possible to determinate the necessary energy to start and propagate the crack in the sample. In this work used the necessary energy to initiate the crack. The values in mechanical tests were compared with the results of composite Glare 1 3/2. The results showed that the laminated composite development in the lab had the fracture resistance lower that composite Glare 1 3/2.*

***Key-Words:** fracture, toughness, laminated composites.*