

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE FIBRA DE CARBONO VISANDO APLICAÇÃO DO CRITÉRIO DE FALHA DE TSAI-WU

Enzo Mendonça Oliveira

Bárbhara do Couto Bousada

Alexandre Martins Reis

Universidade Federal de Viçosa - Av. Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG

enzo.oliveira1898@gmail.com

barbharacouto@gmail.com

amreis@ufv.br

Resumo: O presente trabalho se propôs a determinar os limites de resistência em lâminas de fibras de carbono, orientadas com duas angulações diferentes (0° e 45°), e aplicar o critério de falha de Tsai-Wu nas análises estruturais realizadas pela equipe de aerodesign Skywards UFVoa da Universidade Federal de Viçosa. Para isso, a metodologia se dividiu em fabricação dos corpos de prova; ensaios mecânicos; e análise estrutural dos componentes da aeronave pelo método de Tsai-Wu. Foram feitos ensaios de tração em 12 corpos de provas com as fibras orientadas a 0° e a 45° . Como resultado, o limite de resistência obtido para fibras orientadas a 0° foi igual a 364,9 MPa e para aquelas orientadas a 45° foi de 105,64 MPa, resultando em uma tensão de resistência ao cisalhamento de 52,8 MPa, que estão de acordo com os valores observados nas referências bibliográficas consultadas. Além disso, pôde-se verificar que as curvas de tensão versus deformação do material para ambas angulações se comportaram como era esperado, entretanto, houve uma maior discrepância entre os resultados obtidos com as amostras das fibras orientadas a 0° do que aquelas orientadas a 45° . As análises estruturais resultaram em componentes bem dimensionados, de acordo com o conhecimento da equipe, e permitiram uma análise mais criteriosa da falha dos mesmos. Por fim, conclui-se que o método de Tsai-Wu é valioso para avaliar o desempenho de fibra de carbono e que a metodologia empregada é confiável para obtenção das resistências mecânicas desejadas.

Palavras-chave: Fibra de Carbono; Materiais Compósitos; Ensaio de Tração; Critério de Tsai-Wu

1. INTRODUÇÃO

Tecnologias modernas exigem materiais avançados, ou seja, que possuam combinações incomuns de propriedades que não podem ser atendidas pelas ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos convencionais. A busca por materiais estruturais que possuam baixa densidade e que ao mesmo tempo sejam rígidos e resistentes levou à criação dos compósitos, que são, de maneira geral, qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação dessas propriedades (CALLISTER, 2000).

As áreas de aplicação dos materiais compósitos incluem as indústrias aeroespacial, naval, esportiva, de transporte e de construção civil. Um dos maiores exemplos de sua utilização está na aeronáutica, com o Boeing 787, em que os compósitos representam 50% de sua estrutura (CAMPBELL, 2010).

Devido às suas características peculiares, os projetos de estruturas que envolvem materiais compósitos, são também mais complexos quando comparados àqueles que utilizam materiais convencionais. Para prever o estado de tensão no qual as falhas irão ocorrer, são utilizados ensaios experimentais que ajudam a determinar os limites de resistência do material em carregamentos com direções específicas. Com o conhecimento dos valores limites de tensão do material, deve-se aplicar um critério de falha para avaliar se o mesmo falhará quando submetido a um dado carregamento (COSTA, 2010).

Existem diversas teorias para previsão de falha em materiais, e dentre elas, uma das mais utilizadas é a de Tsai-Wu, já que para sua aplicação não é necessário conhecer previamente o estado de tensão do componente, ou seja, se este está sob tração, compressão ou cisalhamento, além de ser de fácil implementação computacional. O critério de Tsai-Wu fornece previsões que vão desde o aceitável até o excelente quando comparado com resultados de testes (KASSAPLOGOU, 2010).

No âmbito estudantil, os compósitos são amplamente utilizados na competição de Aerodesign, na qual equipes que representam a instituição de ensino a que estão ligadas são desafiadas anualmente a projetar e construir uma aeronave rádio controlada cargueira, que voe com o máximo de carga possível. Para tal, devem ser extremamente leves sem perder a resistência, sendo esse o motivo pelo qual os compósitos são empregados, em especial a fibra de carbono, de vidro e aramida.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi determinar os limites de resistência em laminados de fibras de carbono, com as fibras orientadas a 0° e 45° , e aplicar o critério de falha de Tsai-Wu nas análises estruturais do projeto de uma aeronave radio controlada não tripulada realizadas pela equipe de aerodesign Skywards UFVoa da Universidade Federal de Viçosa.

2.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos, foram elencados os seguintes:

- Construir corpos de prova uniformes e de boa qualidade, especificados pela norma ASTM D3039M- (2014), levando em consideração aspectos de preparação de material, como a direção das fibras do laminado e cura a vácuo;
- Realizar ensaios mecânicos com fibras orientadas à 0° e 45° , a fim de obter as características de resistência do material para tração, compressão e cisalhamento;
- Aplicar o critério de falha de Tsai-Wu, analiticamente e por meio de elementos finitos, em componentes da aeronave projetada pela equipe Skywards UFVoa no ano de 2021, procurando avaliar a confiabilidade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Compósitos

Muitos materiais compósitos são compostos por apenas duas fases; uma é chamada de matriz, que é contínua e envolve outra fase, chamada frequentemente de fase dispersa. Dentre as composições que se encaixam nessa descrição, existem três principais: compósitos estruturais, compósitos reforçados com partículas e os reforçados com fibras; sendo o último o mais importante tecnologicamente, pois apresentam alta resistência (e/ou rigidez) em relação ao peso (CALLISTER, 2000).

Os tipos mais comuns de fibras utilizadas são as unidirecionais (onde todas as fibras estão alinhadas em uma direção qualquer) e as bidirecionais (onde as fibras estão orientadas em duas direções mutuamente perpendiculares). Cada camada em uma sequência de empilhamento é denotada pela sua orientação θ (em graus) relativa ao eixo de referência ($-90^\circ < \theta < 90^\circ$), como mostrado na Fig 1.

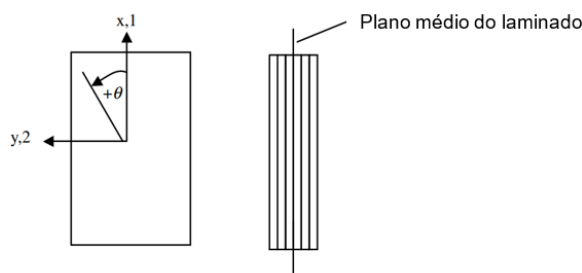


Figura 1. Orientação das fibras relativa ao eixo de referência
(Adaptado KASSAPLOGOU, 2010)

3.2 Propriedades mecânicas dos compósitos

Compósitos laminados fibrosos são constituídos pela união de duas ou mais lâminas (ou camadas), que são orientadas de forma que o componente estrutural resultante tenha as características físicas e/ou mecânicas desejadas em diferentes direções (CHAWLA, 2012).

A lâmina apresenta características ortotrópicas, ou seja, tem propriedades que são diferentes em 3 direções mutuamente perpendiculares, e a carga aplicada paralelamente a esses eixos produz apenas tensões normais. Entretanto, cargas que não são aplicadas paralelamente, produzem ambas tensões normais e cisalhantes.

Para ser possível avaliar as tensões em uma lâmina de um compósito fibroso, é necessário compreender como avaliar as tensões nas direções desejadas a partir de tensões conhecidas em uma direção qualquer, ou seja, compreender o procedimento de transformação de tensões.

Neste trabalho, o estudo de transformação de tensões abordou apenas o estado plano de tensões, que segundo BEER (2011) é uma situação na qual duas das faces do elemento de volume estão livres de qualquer tensão. Se o eixo z for escolhido como perpendicular a essas faces, temos $\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$, e as únicas componentes de tensão restantes são

σ_x , σ_y e τ_{xy} (Fig. 2a). Uma situação assim ocorre em uma placa fina submetida a forças que atuam no plano médio da espessura da placa, que é um caso comum em estruturas fabricadas com compósitos fibrosos (Fig. 2b).

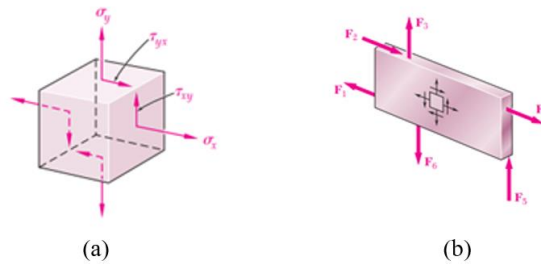


Figura 2. a) Tensões em um elemento de volume; b) Esforços em uma placa fina (BEER, 2011)

Dessa forma, nos carregamentos uniaxiais analisados nesse trabalho, as tensões para direções diferentes das principais são obtidas a partir do estado plano de tensões seguindo as Eq. (1), (2) e (3), desenvolvidas em BEER, 2011.

Onde σ_x é a tensão na direção do carregamento uniaxial. σ_1 , σ_2 e τ_{12} representam as tensões nas direções que se deseja analisar, ou seja, no sentido principal e transversal das fibras e no plano em que elas se encontram. θ é o ângulo entre o carregamento e a direção principal das fibras.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} [1 + \cos 2\theta] \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x}{2} [1 - \cos 2\theta] \quad (2)$$

$$\tau_{12} = -\frac{\sigma_x}{2} \sin 2\theta \quad (3)$$

3.3 Ensaio de tração

Os ensaios mecânicos objetivam avaliar diversas propriedades mecânicas do material e são tipicamente destrutivos. Dentre os ensaios mecânicos existentes, se destaca o ensaio de tração, que se baseia na aplicação gradativa de uma força de tração centrada em um corpo de prova. A máquina de ensaio de tração é projetada para alongar o corpo de prova a uma taxa constante, além de medir continuamente e simultaneamente a carga instantânea aplicada (com uma célula de carga) e os alongamentos resultantes (usando um extensômetro) (CALLISTER, 2000). Como resultado deste tipo de ensaio, obtém-se um diagrama de tensão-deformação semelhante ao da Fig. 3. A partir deste diagrama, diversas propriedades podem ser obtidas, como tensão limite de resistência, tensão de escoamento, módulo de elasticidade entre outras.

No caso específico das fibras laminadas, que em geral, apresentam um comportamento frágil (fratura não precedida de um alongamento significativo), seu diagrama é semelhante ao representado pela curva 1 da Fig. 3, diferentemente de um metal, que se enquadra no comportamento dútil (curva 2).

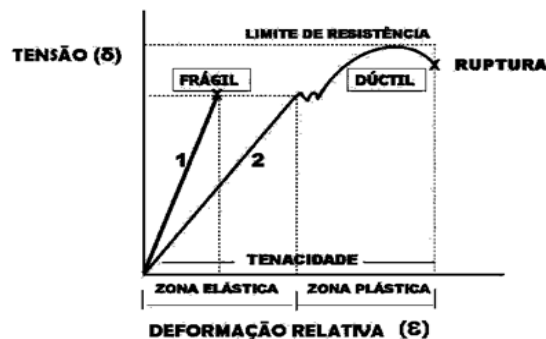


Figura 3. Gráfico tensão x deformação (Adaptado GOMES, 2020)

3.4 Critério de falha de Tsai-Wu

Os critérios de falha são métodos destinados a prever a falha de um material a partir de um estado de tensões conhecido. Dentre os métodos criados especificamente para materiais compósitos, destaca-se o critério de falha de Tsai-Wu, representado pela Eq. (4).

$$\frac{\sigma_x^2}{X^t X^c} + \frac{\sigma_y^2}{Y^t Y^c} - \sqrt{\frac{1}{X^t X^c} \frac{1}{Y^t Y^c}} \sigma_x \sigma_y + \left(\frac{1}{X^t} - \frac{1}{X^c} \right) \sigma_x + \left(\frac{1}{Y^t} - \frac{1}{Y^c} \right) \sigma_y + \frac{\tau_{xy}^2}{S^2} = 1 \quad (4)$$

Onde:

- X^t e X^c são as tensões de resistência à tração e compressão na direção X, respectivamente;
- Y^t e Y^c tensões de resistência à tração e compressão na direção Y;
- S é a tensão de resistência ao cisalhamento no plano;
- σ_x , σ_y e τ_{xy} : são respectivamente as tensões normais em x, y e cisalhantes atuantes no estado de tensões analisado.

Quando o resultado da Equação 4 for maior que 1, significa que o material chegou à falha, e quando for menor que 1, significa que ele está seguro.

Este critério é considerado vantajoso pois é generalista, ou seja, independe do tipo de carregamento aplicado ao material (tração, compressão ou cisalhamento); sua aplicação é direta, ao contrário de outros métodos, que utilizam diferentes equações para cada tipo de carregamento e, por vezes, não consideram a interação entre as tensões existentes. Além disso, é citado por KASSAPOGLOU (2010) que o critério de Tsai-Wu fornece previsões que vão do aceitável ao excelente quando comparado com resultados de testes práticos.

3.5 Fabricação: hand lay-up e cura a vácuo

O processo de laminação manual (hand lay-up) é simples, econômico e não necessita de grandes aparatos tecnológicos e mão de obra especializada. Nesse processo as fibras são colocadas no interior do molde e a resina é introduzida e impregnada uniformemente à mão com o auxílio de rolos ou espátulas (CAMPOS, 2017).

Após dispor a resina impregnada no molde, um processo de cura a vácuo pode ser utilizado para otimizar o produto final, pois a diferença de pressão entre o interior do diafragma e o ambiente externo, provoca uma expulsão do excesso de resina impregnada, aumentando a porcentagem de fibras do laminado. O processo facilita também a retirada de bolhas de ar do laminado e de voláteis resultantes do processo de cura da resina.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais utilizados

O material compósito, objeto de estudo deste trabalho, foi obtido a partir de um tecido de fibra de carbono bidirecional RC200P fabricado pela E-COMPOSITES®, resina epoxy AR720 e endurecedor AH723 (indicados para uso em laminação manual e a vácuo).

4.2 Fabricação do laminado

A fabricação do laminado foi dividida em 10 etapas cuja sequência é apresentada na Fig. 4.

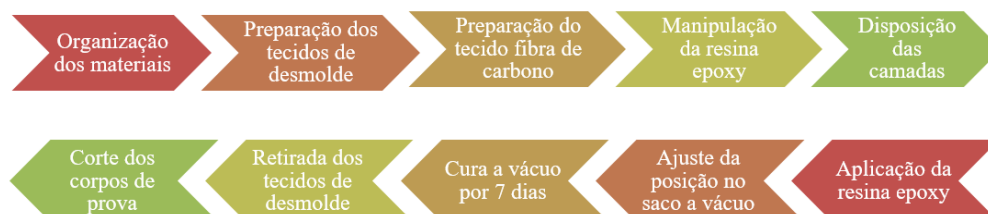


Figura 4. Fluxograma das etapas de fabricação
(Fonte: Autores)

Os tecidos das fibras de carbono foram cortados na dimensão 800 x 500 mm, com 3 camadas cada, e em seguida pesados, para que fosse calculada a proporção correta de resina e endurecedor.

Através da proporção fornecida pela empresa E-COMPOSITES®, reservou-se em recipientes diferentes a mesma massa de tecido em resina e 1/3 em endurecedor. Misturou-se os dois fluidos com auxílio de um palito descartável em movimentos circulares até homogeneizá-los. Para que a matriz fosse uniformemente distribuída, derramou-a

gradativamente pelo tecido e espalhou-a utilizando espátulas. A camada de tecido de fibra com a matriz já impregnada se localiza entre camadas de tecidos de desmolde.

Logo após o procedimento de laminação, colocou-se o conjunto em um saco para que a cura acontecesse a vácuo, com o auxílio de uma bomba pneumática.

4.3 Preparação dos corpos de prova

A cura da matriz levou 7 dias em temperatura ambiente e, logo após, cortou-se 12 corpos de prova de acordo com a norma ASTM D3039 para cada tratamento, formando retângulos de 15 mm de largura por 250 mm de comprimento.

Com o auxílio de um gabarito impresso (Fig. 5), os corpos de prova foram cortados, respeitando a direção das fibras (0° e 45°), e em seguida foi realizado um acabamento com lixa fina.

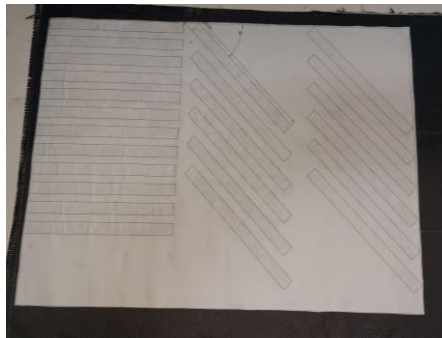


Figura 5. Gabarito impresso com o posicionamento dos corpos de prova para o corte
(Fonte: Autores)

4.4 Ensaios Mecânicos

As propriedades mecânicas das lâminas estudadas foram obtidas por meio de ensaios de tração realizados no Laboratório de Embalagens (LABEM) do Departamento de Tecnologia de Alimentos da UFV (DTA – UFV). Os ensaios foram feitos para corpos de prova com as fibras orientadas à 0° e 45° em relação ao sentido de aplicação da força de tração.

4.4.1 Ensaio uniaxial de tração

Para a realização dos ensaios uniaxiais de tração, seguiu-se a norma ASTM D3039, com as fibras orientadas à 0°, e utilizou-se a máquina universal de ensaios do LABEM, uma INSTRON 3367 montada como uma célula de carga de 30 kN, como pode ser visto na Fig. 6.



Figura 6. INSTRON 3367 com a célula de carga de 30 N
(Fonte: Autores)

A partir dos ensaios, foi possível obter a tensão limite de resistência à tração para cada corpo de prova com a seguinte equação:

$$\sigma = \frac{F}{b * e} \quad (5)$$

Onde F (N) é a força máxima aplicada pela máquina até a ruptura do material, b (mm) e, e (mm) são respectivamente a largura e a espessura do corpo de prova.

4.4.2 Ensaio de cisalhamento por tração à 45°

Para a realização dos ensaios de cisalhamento por tração, seguiu-se a norma ASTM D3518, com as fibras orientadas à 45°. A máquina e a célula de carga utilizadas são as mesmas dos ensaios uniaxiais de tração, e a execução também é a mesma, alterando apenas a orientação das fibras dos corpos de prova. A obtenção da tensão limite de resistência ao cisalhamento no plano é feita pela Eq. (6), retirada da própria norma aplicada ao ensaio.

$$\tau = \frac{\sigma_{45^\circ}}{2} \quad (6)$$

Onde σ_{45° é a tensão de resistência a tração para o corpo de prova à 45°.

4.5 Aplicação do critério de Tsai-Wu

Com os dados obtidos nos ensaios, é possível substituir as variáveis relacionadas à resistência do material na equação do critério de falha de Tsai-Wu. Para tal, algumas considerações foram feitas:

- Como o tecido de fibra de carbono estudado é bidirecional, as propriedades nas direções 0° (X) e 90° (Y) são iguais. Portanto $X^C = Y^C$ e $X^T = Y^T$.
- Como no presente trabalho não foi realizado teste de compressão, a variável relacionada à resistência à compressão foi estimada. Assim, o seguinte procedimento foi realizado: aplicou-se a equação de Tsai-Wu no estado de tensões existente nos resultados dos ensaios à 45° (Fig. 7) e igualou-se a 1, pois foi neste estado de tensão que houve a falha do material; quando isto é feito, só resta a variável que representa a resistência à compressão, portanto ela pode ser isolada e descoberta.

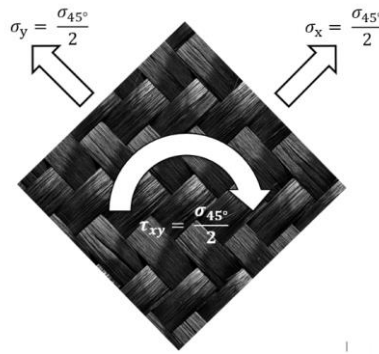


Figura 7 - Esquema do estado de tensão do corpo de prova à 45°
Fonte: Autores

Dessa forma, chegou-se na equação 7, que pode ser aplicada em qualquer estado de tensão que o material estudado esteja submetido, prevendo assim sua falha.

$$\frac{1}{X^T X^C} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y) + \left(\frac{1}{X^T} - \frac{1}{X^C} \right) (\sigma_x + \sigma_y) + \frac{\tau_{xy}^2}{S^2} = 1 \quad (7)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resistência a tração

Os ensaios uniaxiais de tração geraram gráficos de Força versus Deformação, que com a aplicação da Eq. (5) se transformam em gráficos de Tensão versus Deformação, conforme a Fig. 8.

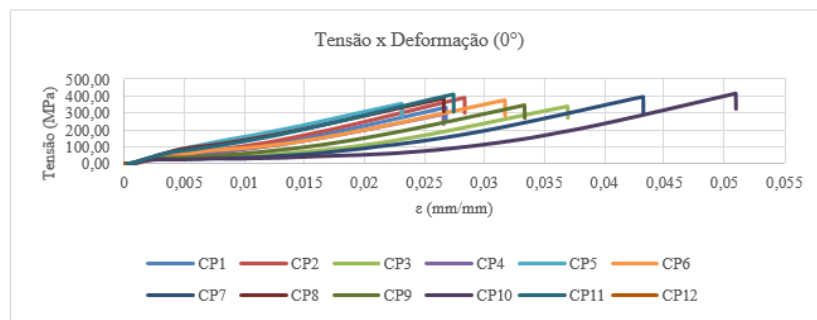


Figura 8. Gráfico Tensão versus Deformação a 0° de todos os corpos de prova
(Fonte: Autores)

Os gráficos apresentaram uma grande zona de acomodação (região anterior a zona elástica que não apresenta comportamento linear) com uma grande dispersão, o que fez com que as curvas estivessem muito espaçadas. Visto que tal comportamento difere completamente daqueles encontrados em referências bibliográficas que realizaram testes similares, deve-se supor que uma possível explicação para esse comportamento é a ocorrência de um pequeno deslizamento entre a garra da máquina e as amostras durante o início do ensaio. Como as garras são em formato de cunha, como visto na Fig. 6, a força de aderência aumenta progressivamente com o decorrer do teste, até atingir uma estabilidade da fixação dos corpos de prova que anule esse deslizamento, gerando assim a região linear visualizada nas curvas. Tais regiões lineares de todos os corpos de prova possuem uma angulação semelhante, e, portanto, módulos de elasticidade semelhantes, assim como esperado, pois todas as amostras foram retiradas da mesma placa laminada.

A falha ocorreu sempre de forma catastrófica, ou seja, abruptamente e sem grandes deformações aparentes, característica intrínseca a materiais frágeis. Além disso, o modo de falha foi predominantemente o mesmo e foi categorizado de acordo com a norma ASTM D3039 pelo código SGV, onde a primeira letra representa o tipo de falha, a segunda a área da falha e a terceira o local da falha. Dessa forma, SGV significa que a falha foi através de uma divisão longa, ocorrendo na área de medição e em múltiplos locais ao longo do comprimento.

A falha em múltiplos locais, que é visualizada claramente na Fig. 9, se justifica pelo processo de fabricação manual, que gera pequenos enrugamentos de resina em diversas regiões do laminado, sendo potenciais concentradores de tensão e propagadores de trincas.

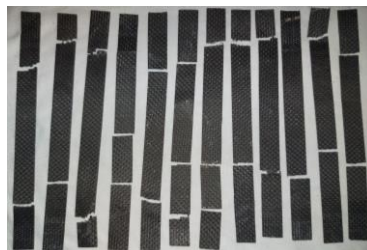


Figura 9. Falha nos corpos de prova à 0°
(Fonte: Autores)

O valor da tensão de resistência à tração encontrado está na Tabela 1.

Tabela 1. Média e Desvio padrão da tensão de resistência a tração

Valor Médio	364,9 MPa
Desvio Padrão	36 MPa

5.2 Resistência ao cisalhamento

As curvas de Tensão versus Deformação resultantes do ensaio de cisalhamento por tração à 45° são visualizadas na Fig. 10.

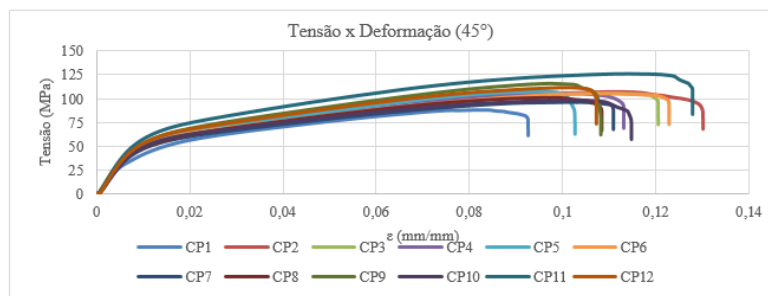


Figura 10. Gráfico Tensão versus Deformação a 45° de todos os corpos de prova
(Fonte: Autores)

Diferentemente dos ensaios uniaxiais de tração, os ensaios de resistência ao cisalhamento apresentaram uma maior uniformidade e uma zona de acomodação significativamente menor. Isso se deve a forma como a falha ocorre: durante todo o teste, as fibras, que estão orientadas à 45° do sentido de força, tendem a se alinhar com este, rompendo a resina no local de falha e posteriormente a fibra, ocasionando uma ruptura mais lenta e progressiva. Assim, quaisquer defeitos mínimos de fabricação, que levariam a falha do material em uma ruptura frágil, agora interferem menos no comportamento dos corpos de prova.

Os menores valores encontrados, quando comparados aos ensaios uniaxiais de tração, são corroborados pelas referências bibliográficas. A explicação é que, enquanto no primeiro ensaio as propriedades são governadas pela fibra, neste a resina tem um papel mais significativo. Dessa forma, como as fibras são substancialmente mais resistentes que a resina, é esperado o comportamento apresentado na Fig. 10.

O formato das curvas é semelhante àquele encontrado em materiais dúcteis, com as regiões plásticas e elásticas bem marcadas. Durante a fase plástica, onde há uma maior deformação não-linear do corpo de prova para menores taxas de variação de força, foi observado um fenômeno também típico de materiais dúcteis sujeitos a ensaios de tração, o chamado empescoamento ou estricção, como visto na Fig. 11.



Figura 11. Momento onde ocorre a estricção no corpo de prova
(Fonte: Autores)

O modo de falha predominante é categorizado como XGM, ou seja, explosivo, ocorrendo na área de medição e no meio do comprimento. O estado dos corpos de prova pós ensaios (Fig. 12), mostram que este é o código adequado.

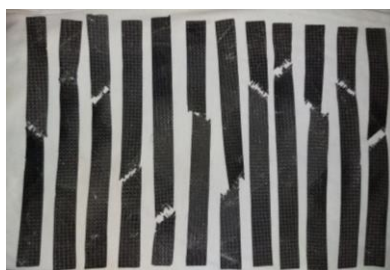


Figura 12. Falhas nos corpos de prova a 45°
(Fonte: Autores)

Encontrando a tensão de resistência à tração para espécimes com fibras orientadas à 45°, pode-se calcular a tensão de resistência ao cisalhamento no plano por meio da equação 6. A Tabela 2 apresenta este resultado.

Tabela 2. Média e Desvio padrão da tensão de resistência a cisalhamento

Valor Médio	52,8 MPa
Desvio Padrão	4,86 MPa

5.3 Análises estruturais utilizando o critério de falha de Tsai-Wu

A partir dos dados coletados nos ensaios é possível isolar a variável de resistência à compressão (X^C) na Equação 7 e assim descobrir seu valor teórico. Em seguida, ao substituir todas as variáveis de resistência do material na Equação 7 pelos seus valores encontrados nos ensaios, tem-se com resultado a Equação 8, pronta para uso em análises estruturais.

$$\frac{1}{113626}(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y) - 4,7 * 10^{-4}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{\tau_{xy}^2}{2284,8} = 1 \quad (8)$$

Para avaliar o uso prático do critério de falha de Tsai-Wu, ele foi utilizado no projeto da aeronave de 2021 da equipe de Aerodesign Skywards UFVoa. Aqui iremos ressaltar dois componentes que foram projetados com a fibra de carbono estudada neste trabalho: a longarina e o trem de pouso. Eles foram escolhidos pois a análise estrutural do primeiro foi analítica, aplicando diretamente a equação 8. Já o segundo foi projetado através de uma análise numérica, pois sua geometria e os esforços atuantes são complexos. Para isso, utilizou-se o software de elementos finitos Ansys, onde as propriedades do material são inseridas no programa e ele realiza o cálculo das tensões e da previsão de falha seguindo um critério escolhido pelo projetista.

Como longarina da aeronave apresenta um comportamento de viga e possui um estado de tensões crítico conhecido, seu dimensionamento estrutural se resumiu a inserir essas variáveis na equação 8. Dessa forma, este processo foi rápido e efetivo, já que considera todas as tensões atuantes (nas direções X, Y e no plano XY) e a influência de umas nas outras.

O trem de pouso apresentou uma margem final de 0,04. Na simulação, é possível visualizar o valor máximo encontrado com a aplicação da equação 8 (0,96) por toda a estrutura e em que local isto está ocorrendo.

Em ambos os componentes, foram observadas vantagens na aplicação do critério de Tsai-Wu quando comparado aos outros critérios utilizados anteriormente pela equipe. Houve uma facilidade na previsão da falha, pois não foi mais necessário analisar as tensões máximas de tração, compressão e cisalhamento separadamente; consequentemente o processo de reprojetar para se chegar na estrutura ótima foi facilitado e o tempo necessário para fazê-lo foi diminuído. Além disso, por ser o critério mais recomendado para materiais compósitos, as estruturas finais são mais confiáveis, otimizando assim a relação entre peso e segurança contra a falha.

6. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que a metodologia aplicada é eficiente para obter as propriedades de resistência mecânica de compósitos fibrosos e aplicá-las em critérios de falha específicos.

A construção dos corpos de prova foi satisfatória, com boa uniformidade, e os métodos de fabricação utilizados (laminação manual e cura a vácuo) são excelentes para essa aplicação pois combinam a facilidade de execução com a qualidade do produto final. Entretanto, caso seja necessária uma menor dispersão nos gráficos gerados com os ensaios, um método de laminação mecanizado seria mais adequado.

Conclui-se também que a resistência de um laminado fibroso depende da orientação de suas fibras em relação à direção de aplicação do esforço. Os corpos de prova com as fibras orientadas à 0° se mostraram 280% mais resistentes que aqueles orientados à 45°. As curvas tensão-deformação se comportaram como esperado, provando que os parâmetros utilizados nos ensaios foram corretos. O descuido que houve durante a fixação dos corpos de prova à 0° não pode ser repetido em trabalhos futuros, o que irá garantir uma maior invariabilidade nas curvas.

A aplicação do critério de falha de Tsai-Wu foi eficiente. Após a obtenção das variáveis da equação, seu uso fica simples e rápido, tanto numericamente como analiticamente. Em softwares de simulação estrutural, sua utilização permite uma análise completa do comportamento da fibra.

7. AGRADECIMENTOS

Listamos os nossos agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) que contribuiu financeiramente para realização dessa pesquisa, e ao Laboratório de Embalagens (LABEM) do Departamento de Tecnologia de Alimentos da UFV (DTA – UFV) que disponibilizou sua estrutura para realização dos ensaios.

8. REFERÊNCIAS

BEER, Ferdinand P. et al. Mecânica dos Materiais. 5. ed. Nova Iorque: Amgh Editora Ltda, 2011. 800 p.

- CALLISTER JUNIOR, William D.. Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução. 5. ed. The University Of Utah: Ltc, 2000.
- CAMPBELL, F. C. et al. Introduction to Composite Materials. In: CAMPBELL, F. C.. Structural Composite Materials. - : Asm International, 2010. p. 29.
- CAMPOS, Virginia Bezerra Oliveira. Análise de critérios de falha em lâmina reforçada com tecido híbrido de fibra de vidro e carbono. 2017. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- CHAWLA, Krishan K.. Composite Materials: science and engineering. 3. ed. Birmingham: Springer, 2013. 552 p.
- COSTA, D. I. G.; ALBUQUERQUE, E. L.; REIS, A.; PANOSSO, G.; SOLLERO, P.. Análise Numérica de Falhas em Laminados Usando Um Critério Baseado Em Fenômenos Físicos. Mecânica Computacional Vol XXXIX, págs. 5173-5187. Buenos Aires-Argentina, 2010.
- GOMES, Luiz. Biomateriais em Artoplastia de Quadril: Propriedades, Estrutura e Composição. Atheneu, primeira edição, janeiro, 2010.
- E-COMPOSITES. Tecidos. Disponível em: <https://www.e-composites.com.br/tecidos>. Acesso em: 15 de outubro de 2021.
- KASSAPOGLOU, Christos. Design and Analysis of Composite Structures: with applications to aerospace structures. The Netherlands: A John Wiley And Sons, 2010.
- UDUPI, Sathish Rao et al. Detecting Safety Zone Drill Process Parameters for Uncoated HSS Twist Drill in Machining GFRP Composites by Integrating Wear Rate and Wear Transition Mapping. Indian Journal of Materials Science, India, 2016.
- GAS-ENG. O processo de fabricação de um compósito por laminação a vácuo (vacuum bag). Disponível em: <https://www.gas-eng.com.br/post-unico/2018/06/04/o-processo-de-fabrica-c3-a7-c3-a3o-de-um-comp-c3-b3sito-por-lamina-c3-a7-c3-a3o-a-v-c3-a1>. Acesso em 15 de outubro de 2021.

9. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

MECHANICAL CHARACTERIZATION OF CARBON FIBER FOR TSAI-WU FAILURE CRITERION APPLICATIONS

Enzo Mendonça Oliveira
Bárbhara do Couto Bousada
Alexandre Martins Reis

Universidade Federal de Viçosa - Av. Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG
enzo.oliveira1898@gmail.com
barbharacouto@gmail.com
amreis@ufv.br

Abstract. *The present work propose to determine the strength limits in carbon fiber sheets, oriented in two different angles (0° and 45°), and to apply the Tsai-Wu failure criterion in the structural analyzes carried out by the aerodesign team Skywards UFVoa from Federal University of Viçosa. To do that, the methodology was divided into the manufacture of test specimens; mechanical tests; and structural analysis of aircraft components by the Tsai-Wu method. Tensile tests were performed on 12 specimens with the fibers oriented at 0° and 45°. As a result, the strength limit obtained for fibers oriented at 0° was equal to 364.9 MPa and for those oriented at 45° it was 105.64 MPa, resulting in a shear strength of 52.8 MPa, which are in accordance with the values observed in the bibliographical references. Besides that, it was possible to verify that the stress versus strain curves of the material for both angulations behaved as expected, however, there was a greater discrepancy between the results obtained with the samples of fibers oriented at 0° than oriented at 45°. Structural analyzes resulted in well-sized components, according to the team's knowledge, and allowed a more refined analysis of their failure. In conclusion, the Tsai-Wu method is valuable to evaluate the performance of carbon fiber and the methodology used is reliable to obtain the desired mechanical strengths.*

Keywords: Carbon Fiber; Composite Materials; Tensile Test; Tsai-Wu Criterion

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.