

COMPORTAMENTO EM COMPRESSÃO E CISALHAMENTO DO COMPÓSITO DE FIBRA DE ALGODÃO E MATRIZ POLIÉSTER

Danilo Cordella Rodrigues, d2019014425@unifei.edu.br¹
Felipe de Souza Eloy, felipeeloy7@yahoo.com.br²

¹Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá – MG

Resumo: O objetivo do presente estudo foi estudar o comportamento em compressão e cisalhamento no plano para o compósito de fibra de algodão com matriz em resina poliéster considerando os esforços do ensaio na direção longitudinal e transversal à fibra. O trabalho se mostra relevante pois trata-se de um estudo que visa obter informações ainda não encontradas na literatura a respeito de um material que atende as novas demandas do mercado. As vantagens são ligadas à sustentabilidade, já que a fibra é natural e, portanto, não apresenta os prejuízos do descarte de compósitos em fibras sintéticas, baixo custo, menor densidade e abrasividade que fibras sintéticas e gera oportunidades de emprego no meio rural. Além disso, fibras de algodão são atualmente as mais utilizadas no mundo, portanto é relevante entender seu comportamento quando aliada às diferentes matrizes no caso da utilização como compósito. Para isso, foram utilizados Corpos de Prova (C.D.P) adequados à norma ASTM 3410. Os C.D.P para cada uma das duas direções do ensaio foram fabricados a partir do processo de VARTM (Moldagem por Transferência de Resina Assistida a Vácuo), sendo cinco laminados de 8 camadas para cada orientação de fibra (0° e 90°). Posteriores operações de corte foram feitas para se obterem as geometrias adequadas à norma do ensaio. A compressão foi realizada em uma máquina universal de ensaios. As amostras foram levadas até a falha, e a partir disso os dados foram adquiridos pelo sistema que forneceu informações a respeito do limite de resistência a compressão nas direções requisitadas. O limite de resistência ao cisalhamento no plano e o módulo de cisalhamento foram obtidos pela aplicação de equações previstas na teoria dos laminados e a partir de dados da literatura sobre resistência à tração do compósito. As propriedades obtidas foram comparadas com as de outros dois materiais compósitos, sendo eles a fibra unidirecional de vidro com matriz epóxi e a fibra de juta com matriz poliéster. A partir do trabalho, nota-se que o material apresenta boas propriedades de resistência mecânica, sendo assim, promissor para diferentes aplicações.

Palavras-chave: Fibra de algodão, Ensaios mecânicos, Compósitos naturais, Resistência à compressão, Resistência ao cisalhamento

1. INTRODUÇÃO

Compósitos fabricados a partir de matérias primas naturais são tendência nos dias atuais em busca da aliança entre desenvolvimento de novos materiais e maior preservação do meio ambiente. As opções de fibras e madeiras na biodiversidade, principalmente do território brasileiro, apresenta um leque imenso de opções para as mais diversas aplicações. O investimento neste setor tem potencial tanto para a geração de receita em comunidades rurais no caso da fabricação e cultivo da matéria prima com maquinário mais simples quanto para a indústria, que trabalharia com outras frentes de fabricação mais complexas, como já relatado por Marinelli *et al.* (2008).

Tratando de compósitos reforçados por fibras, é de grande preocupação a questão do descarte. Fibras sintéticas de carbono, vidro, aramida e outras, apesar de serem usadas em larga escala, apresentam uma característica indesejável em comum: a não-biodegradabilidade, fazendo que essas tenham refugo até mesmo no próprio meio ambiente, como descreve Mattoso *et al.* (1999).

É nesse sentido que, cada vez mais, são empregados esforços para o desenvolvimento destes novos materiais. Entre a incontável opção de fibras naturais possíveis de serem empregadas, é dado destaque à fibra de algodão, alvo do presente trabalho, e especificamente formando um material composto com a resina poliéster, em função do baixo custo final obtido da união entre essa matriz e o reforço citado.

A fibra de algodão é cultivada há milênios e é predominantemente encontrada na indústria têxtil. Diferentes variáveis influenciam nas suas propriedades como compósito. Como citado por Rennó *et al.* (2019), fatores genéticos, método de cultivo, temperatura, solo, entre outros podem dar origem à fibras com diferentes diâmetros e qualidade. Um ponto forte

da utilização dessa fibra, além da sua biodegradabilidade, é o baixo custo, por ser popular e a mais utilizada no mundo.

Além disso, ela apresenta inúmeras características interessantes, entre elas, descrita por Santos *et al.* (2019), a alta cristalinidade, em torno de 70%, que confere maior rigidez, resistência à tração, estabilidade dimensional, resistência a abrasão, temperatura de fusão, etc, muitas sendo desejáveis em aplicações estruturais. Sua união com uma matriz polimérica também é atrativa, pois, segundo Borsoi *et al.* (2011), pode promover o aumento do módulo de elasticidade e resistência mecânica, com redução do peso final do compósito. Entretanto, também deve ser dada atenção para a adesão entre matriz e reforço, já que, para matrizes poliméricas hidrofóbicas, como o poliéster, as fibras, por serem hidrofílicas, devem ser tratadas ou agentes compatibilizantes devem ser utilizados. A aderência citada é de suma importância para que as cargas sejam adequadamente transferidas para a fibra, resultando em maior resistência mecânica do compósito.

Tendo em vista as vantagens citadas, as aplicações de interesse desse material, assim como de outros compósitos reforçados com fibra natural, são as mais diversas possíveis. Faruk *et al.* (2014) discorre a esse respeito. Fibras naturais têm emprego crescente na indústria automobilística. Com seu uso, são fabricados painéis de portas, encontros de banco e revestimentos para porta-malas. Na indústria aeroespacial também podem ser utilizadas, como no caso da fabricação de pás para rotores de helicóptero, como cita Gibson (2016). Al-Azad *et al.* (2021) também lista aplicações possíveis para diferentes fibras naturais conhecidas no mercado. Um interessante exemplo é a utilização de fibras orientadas provenientes da juta aliada com uma matriz natural de coco como uma alternativa econômica para a madeira na indústria de construção civil.

Abaixo, é ilustrado pela Fig. 1 a fibra de algodão em sua forma original, sem qualquer tratamento. Na Figura 2 vemos a fibra de algodão após passar por tratamento. Ambas as imagens foram retiradas de Raftoyiannis (2012).



Figura 1: **Fibra de algodão não tratada**



Figura 2: **Fibra de algodão após tratamento**

Diversas são as informações ainda a serem obtidas a respeito não só do compósito tratado nesse presente estudo, mas da própria fibra de algodão. Para o atual trabalho, em vista de contribuir nesse sentido e viabilizar sua utilização nas aplicações explicitadas, são estudadas propriedades mecânicas a seu respeito ainda não encontradas na literatura. É feito, no Capítulo 1, a introdução a respeito dessa fibra com uma breve revisão bibliográfica, destacando seus pontos positivos e possíveis aplicações. No Capítulo 2, é feito o desenvolvimento do estudo do comportamento em compressão e cisalhamento da fibra de algodão, sem passar por tratamentos, em conjunto com uma matriz em resina poliéster. No Capítulo 3 são ilustrados e discutidos os resultados a respeito das propriedades mecânicas do material e uma comparação numérica com outros dois materiais compósitos. Por fim, no Capítulo 4, são tiradas as conclusões a respeito dos resultados.

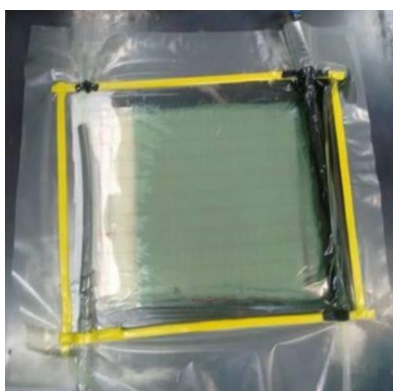
2. DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo será demonstrado o passo a passo utilizado para a obtenção das propriedades mecânicas ligadas ao cisalhamento e à compressão do compósito, partindo de equações previstas na Teoria dos Laminados com dados da literatura e de ensaios mecânicos.

2.1 Comportamento em Cisalhamento

Para o estudo do comportamento em cisalhamento do compósito, foram utilizados dados obtidos a partir do ensaio de tração em Corpos de Prova (C.D.P.) realizado por Rennó *et al.* (2019). Para a fabricação dos C.D.P, foi utilizado o processo de infusão via VARTM (Moldagem por Transferência de Resina Assistida a Vácuo), com uma bolsa de vácuo na parte superior do molde, garantindo a impregnação uniforme de 400g de resina poliéster na fibra de algodão sem tratamentos. A cura da resina foi feita por meio do catalizador Butanox à 1%. Segundo Lawrence and Advani (2003), esse processo de infusão produz ótima aderência entre matriz e reforço, produz bom acabamento superficial com propriedades mecânicas bem controladas e redução significativa de porosidade. O processo de infusão via VARTM é utilizado em larga escala na indústria pois resulta nas características citadas sem a necessidade de equipamentos caros e avançados.

Ainda no ensaio em questão, a partir das placas produzidas conforme explicado, foram fabricados 9 C.D.P em conformidade com a norma ASTM D3039, sendo igualmente divididos entre laminados $[0^\circ]_8$, $[\pm 45^\circ]_8$ e $[90^\circ]_8$, ou seja, laminados com 8 camadas e orientação das fibras de 0° , $\pm 45^\circ$ e 90° respectivamente. Cada amostra tem 25 mm de largura, 250 mm de comprimento e 3 mm de espessura. Cada C.D.P foi tracionado em uma máquina universal de ensaios até a falha, e os dados foram aquiritados. A Fig. 5a ilustra as placas utilizadas para a fabricação dos C.D.P já no processo final de infusão, enquanto a Fig. 5b mostra o C.D.P já posicionado na máquina para o ensaio.



(a) Placas na fase final de infusão.



(b) C.D.P posicionado para ensaio.

Figura 3: Ensaio de Tração.

Feito o ensaio, os resultados obtidos a respeito das propriedades são mostrados na tabela abaixo:

Tabela 1: Propriedades médias por orientação (Rennó *et al.*, 2019).

	$[0^\circ]_8$	$[\pm 45^\circ]_8$	$[90^\circ]_8$
Limite de resistência à tração (MPa)	$77,249 \pm 1,622$	$29,395 \pm 4,119$	$17,715 \pm 0,901$
Módulo de Elasticidade (GPa)	$5,444 \pm 0,213$	$4,133 \pm 0,808$	$2,849 \pm 0,411$
Deformação máxima (mm/mm)	$0,033 \pm 0,001$	$0,025 \pm 0,004$	$0,023 \pm 0,005$
Coefficiente de Poisson	$0,353 \pm 0,096$	$0,291 \pm 0,029$	$0,242 \pm 0,134$

Que serão aplicados mais adiante. Para a obtenção do Módulo de Cisalhamento no plano (G_{12}) e o limite de resistência ao cisalhamento no plano (τ_{12ult}) foram utilizadas manipulações matemáticas segundo Kaw (2005). Vale ressaltar que, ao se aplicar uma tensão normal σ_x no laminado $[\pm 45^\circ]_8$, as tensões cisalhantes locais τ_{12} serão teoricamente iguais em módulo para cada uma das camadas que compõem o laminado, diferindo apenas na direção. Sendo assim, foi feita a aproximação para estado plano de tensões em uma lâmina com as fibras orientadas a 45° .

Temos que, para uma lâmina fina em estado plano de tensões, como mostra a imagem abaixo, a equação matricial da tensão deformação pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

onde: ϵ_1 e ϵ_2 são as deformações normais, γ_{12} é a deformação por cisalhamento, σ_1 e σ_2 são as tensões normais, τ_{12} a tensão cisalhante e S_{ij} são os elementos da matriz de conformidade no sistema de coordenadas local, ou seja, onde o eixo

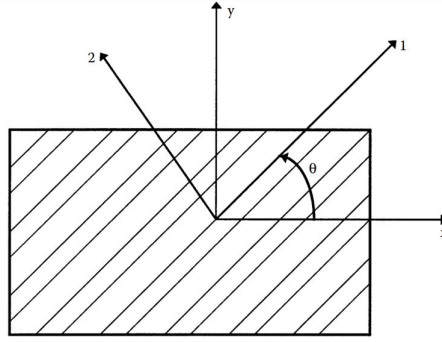


Figura 4: Lâmina fina em estado plano de tensões.

1 corresponde a direção longitudinal à fibra e o eixo 2 à direção transversal à fibra, que podem ser escritos como:

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, \quad (2a)$$

$$S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}, \quad (2b)$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_2}, \quad (2c)$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}}. \quad (2d)$$

Além disso, temos a Matriz de Conformidade transformada para o sistema de coordenadas globais, ou seja, onde o eixo x é longitudinal à fibra se orientada a 0° enquanto o eixo y é transversal. Para o caso geral de lâminas com as fibras orientadas a θ° em relação ao eixo x temos:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{S}] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde:

$$\bar{S}_{11} = S_{11} \cos^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \sin^4 \theta, \quad (4a)$$

$$\bar{S}_{12} = S_{12}(\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) + (S_{11} + S_{22} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta, \quad (4b)$$

$$\bar{S}_{22} = S_{11} \sin^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \cos^4 \theta, \quad (4c)$$

$$\bar{S}_{16} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - 2S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta, \quad (4d)$$

$$\bar{S}_{26} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - 2S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta, \quad (4e)$$

$$\bar{S}_{66} = 2(2S_{11} + S_{22} - 4S_{12} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{66}(\sin^4 \theta + \cos^4 \theta). \quad (4f)$$

Podemos, ainda, escrever a equação da tensão deformação da lâmina em função das suas constantes elásticas, como se segue:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & -\frac{m_x}{E_1} \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{m_y}{E_1} \\ -\frac{m_x}{E_1} & -\frac{m_y}{E_1} & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

As Equações (3) e (5) são equivalentes, e portanto podemos igualá-las. Como resultado é obtido que:

$$A_{ij} = \bar{S}_{ij} \quad (6)$$

Assim, como o objetivo é calcular G_{12} dispondo dos dados da literatura, iguala-se A_{11} à $\bar{S}_{11}$, de tal forma que:

$$\frac{1}{E_x} = \bar{S}_{11} = S_{11} \cos^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \sin^4 \theta \quad (7)$$

Substituindo a Eq. (2) na Eq. (7) e isolando G_{12} :

$$G_{12} = \frac{E_1 E_2 E_x \cos^2 \theta \sin^2 \theta}{E_1 E_2 - E_1 E_x \sin^4 \theta - E_2 E_x \cos^4 \theta + 2 E_2 E_x \cos \theta \sin^2 \theta \nu_{12}^2} \quad (8)$$

A partir dos dados obtidos do ensaio de tração, é possível encontrar o valor do Módulo de Cisalhamento G_{12} , que será feito mais adiante.

Agora, para o cálculo da Máxima resistência ao cisalhamento (τ_{12ult}), tomemos a Eq. (4a), que como sabido trata-se da equação da tensão deformação da lâmina em coordenadas globais. As tensões as quais a lâmina é submetida podem ser calculadas no sistema de coordenadas locais, ou seja, assim enxergaremos como elas se dividem em tensões normais nas direções longitudinais e transversais à fibra e em tensão cisalhante no plano. Para isso, a matriz que armazena os dados referentes às tensões no sistema de coordenadas global será multiplicada por uma matriz [T], conhecida como Matriz de Transformação de coordenadas, como ilustrado abaixo:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Como o interesse é obter τ_{12ult} a partir dos dados do ensaio de tração, será analisada a Eq. (9) para o caso particular de $\theta = 45^\circ$. Nesse caso, a equação fica reescrita como:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & 0,5 & -1 \\ -0,5 & 0,5 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Com a multiplicação matricial da Eq. (10), uma das constatações feitas é que:

$$\tau_{12} = 0,5(\sigma_y - \sigma_x) \quad (11)$$

Dessa maneira, calcula-se τ_{12ult} a partir da tensão normal máxima suportada pelo laminado $[\pm 45^\circ]_8$, obtida do ensaio.

2.2 Comportamento em Compressão

Para o estudo do comportamento em compressão, foi simplesmente realizado o ensaio nos C.D.P em uma máquina universal de ensaios. A confecção das placas do compósito foi feita da exata maneira do ensaio de tração descrito. Contudo, o corte das placas para obtenção das amostras seguiu a norma ASTM3410, relacionada ao ensaio de compressão de materiais compósitos. Nesse caso, foram 10 C.D.P no total, igualmente divididos entre laminados $[0^\circ]_8$ e $[90^\circ]_8$. Cada C.D.P foi comprimido até a falha pela máquina em uma velocidade constante de 1,5 mm/min e os dados foram aqisitados. A Figura 5 ilustra os C.D.P utilizados, a Tab. 2 mostra suas dimensões e a Fig. 6 ilustra o ensaio na prática.



(a) C.D.P 0°



(b) C.D.P 90°

Figura 5: Corpos de Prova do ensaio de compressão.

Tabela 2: **Dimensões dos C.D.P.**

	$[0^\circ]_8$	$[90^\circ]_8$
Comprimento (mm)	$120,42 \pm 0,34$	$82,86 \pm 0,71$
Largura (mm)	$10,22 \pm 0,18$	$25,4 \pm 0,14$
Espessura (mm)	$3,00 \pm 0,10$	$3,00 \pm 0,10$



Figura 6: **C.D.P em compressão.**

3. RESULTADOS

Por meio dos equacionamentos e ensaios mecânicos devidamente descritos, é possível o levantamento e análise dos resultados, como se segue.

3.1 Comportamento em Cisalhamento

Partindo dos dados ilustrados na Tab. 1, substituiremos na Eq. (8) os dados conhecidos do compósito para $\theta=45^\circ$, assim:

$$G_{12} = \frac{5,444 \cdot 2,849 \cdot 4,133 \cdot \cos^2(45) \cdot \sin^2(45)}{5,444 \cdot 2,849 - 5,444 \cdot 4,133 \cdot \sin^4(45) - 2,849 \cdot 4,133 \cdot \cos^4(45) + 2 \cdot 2,849 \cdot 4,133 \cdot \cos(45) \cdot \sin^2(45) \cdot 0,353^2}$$

Logo, chega-se ao resultado do Módulo de cisalhamento no plano:

$$G_{12} = 1,777 GPa$$

Para o caso da máxima resistência ao cisalhamento temos que, no ensaio de tração, o C.D.P é submetido à uma tensão σ_x até sua falha, enquanto σ_y e τ_{xy} são nulos. Tomando a Eq. (11) com σ_x sendo o valor na falha para o laminado $[\pm 45^\circ]_8$, tirado da Tab. 1, temos:

$$\tau_{12} = 0,5(0 - 29,395)$$

$$\tau_{12} = -14,698 MPa$$

Como a falha por cisalhamento no plano independe da direção, o valor final é $\tau_{12ult} = \pm 14,698 MPa$. Além disso, aplicando $\sigma_x = 29,395 MPa$ com os outros componentes de tensão nulos na Eq. (10), percebe-se que σ_1 e σ_2 não atingem seus valores máximos de resistência, indicando, portanto, que o compósito falha devido ao cisalhamento no plano.

Os dois dados obtidos podem, ainda, serem comparados com de outros materiais compósitos. A partir de Kaw (2005), foram tiradas as propriedades da resina epóxi reforçada com fibra unidirecional de vidro, por se tratar do compósito polimérico de fibra sintética mais utilizado no mercado. De Gowda *et al.* (1999), tiraram-se os dados de interesse do compósito de fibra unidirecional de juta e matriz poliéster, por ser um material com reforço de origem natural que vem sendo amplamente estudado para aplicações estruturais pelo baixo custo e baixa densidade. A Tabela 3 mostra as duas propriedades calculadas anteriormente e sua comparação com os dois materiais citados.

Tabela 3: Comportamento em cisalhamento.

Material compósito	G_{12} (GPa)	τ_{12ult} (MPa)
Poliéster e fibra de algodão	1,777	14,698
Epóxi e fibra de vidro	4,14	72
Poliéster e fibra de juta	2,2	16,5

Nota-se que, entre os três compósitos, a matriz epóxi reforçada com fibra de vidro apresentou de sobremaneira as melhores propriedades mecânicas em cisalhamento, com diferenças superiores a 100% em G_{12} e 400% em τ_{12ult} . Tal resultado já era esperado visto que fibras sintéticas apresentam resistência mecânica muito superior à fibras naturais, como já relata Faruk *et al.* (2014), além do fato de que, como mostra Shah and Lakkad (1981), a resina epóxi segue esse mesmo padrão se comparada com a resina poliéster.

Ademais, a fibra de juta se mostrou mais resistente ao cisalhamento em comparação com a fibra de algodão para um mesmo polímero usado como matriz, e isso se deve às particularidades dos próprios reforços. Entretanto, vale citar que fatores como origem geográfica, fatores climáticos e técnicas de fabricação de compósitos também influenciam em propriedades mecânicas.

3.2 Comportamento em Compressão

As Fig. 7 e 8 mostram os dois gráficos obtidos do ensaio, com o eixo das abscissas sendo correspondente à deformação de cada C.D.P e o eixo das ordenadas à tensão aplicada.

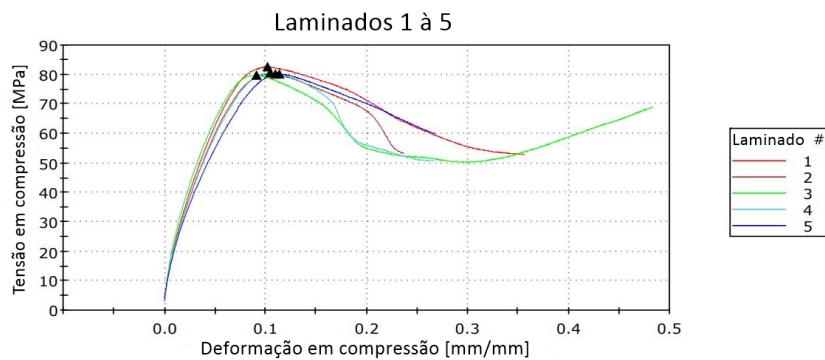


Figura 7: Gráfico do ensaio nos C.D.P 0°

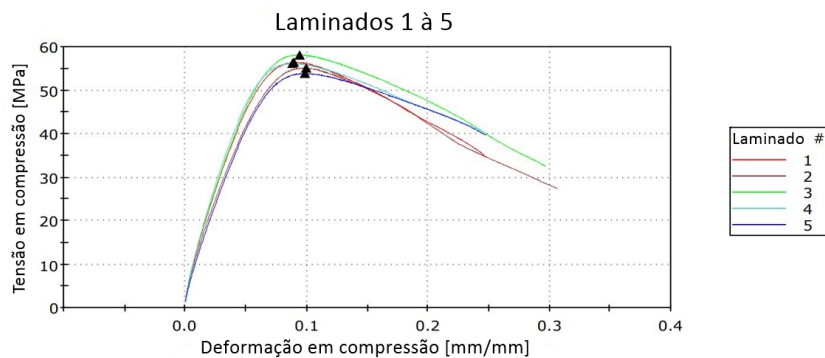


Figura 8: Gráfico do ensaio nos C.D.P 90°

É possível visualizar que, até serem atingidos os valores de máxima resistência à compressão (σ_{ult}^c), representados por triângulos pretos, a curva se comporta de forma praticamente linear, não sendo clara a visualização de uma transição de comportamento elástico para plástico, como comumente visto em materiais dúcteis. Após ser atingido σ_{ult}^c , é observado que a curva passa a ter comportamento decrescente em relação do eixo das ordenadas, indicando a falha no laminado, algo que será explicado adiante. A diferença entre as curvas dos laminados ensaiados se dá pela não-uniformidade do reforço, comum no emprego de fibras naturais, como também observado por Gowda *et al.* (1999).

A seguir, a Tab. 4 mostra os resultados de interesse do presente estudo e dos outros mesmos compósitos da Tab. 3. O desvio padrão para cada um dos resultados tirados do ensaio foi de 1,101 e 1,590 para os laminados $[0^\circ]_8$ e $[90^\circ]_8$, respectivamente.

Tabela 4: **Comportamento em compressão dos compósitos.**

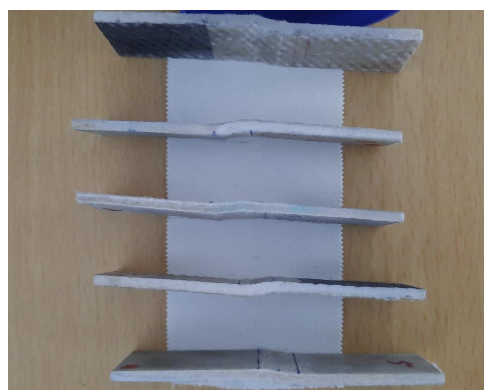
Material compósito	σ_{ult}^c (MPa)
Poliéster e fibra de algodão (0°)	80,543
Poliéster e fibra de algodão (90°)	55,847
Epóxi e fibra de vidro (0°)	610
Epóxi e fibra de vidro (90°)	118
Poliéster e fibra de juta (0°)	45

Percebe-se que, mais uma vez, a resistência mecânica da resina epóxi reforçada com fibra de vidro foi consideravelmente superior, pelos mesmos motivos citados para o comportamento em cisalhamento. Contudo, nota-se que, na compressão, foram obtidos melhores resultados para a matriz poliéster reforçada com fibra de algodão. Além disso, também é observado que a resistência à compressão do compósito de fibra de algodão é cerca de 31% maior quando a carga é aplicada em direção longitudinal ao reforço, se comparada à direção transversal. Isso se dá ao fato que no primeiro caso os esforços são majoritariamente transferidos ao reforço, enquanto no segundo caso isso acontece para a matriz, cenário já esperado com base em Kaw (2005).

Feito o ensaio, também é possível observar inicialmente o modo de falha do compósito quando em compressão. Nesse caso, os C.D.P não foram levados à ruptura. A Figura 9 mostram os C.D.P após ensaiados. Posteriores análises micrográficas podem ser feitas para uma análise precisa do micromecanismo de falha, mas não foram alvo do presente trabalho. Contudo, pela matriz se tratar de uma resina rígida, a tendência é que o compósito apresente uma banda de torção que ocasiona deformação por cisalhamento, e tal fenômeno é resultante também de um bom alinhamento das fibras no compósito, como descrito por Hahn and Williams (1986). A Figura 10, do mesmo autor, demonstra a geometria de uma banda de torção, similar à observada na Fig. 9.



(a) C.D.P 0°



(b) C.D.P 90°

Figura 9: **Corpos de Prova após ensaio de compressão.**



Figura 10: **Banda de torção.**

4. CONCLUSÃO

A partir dos dados obtidos nesse trabalho, constata-se mais uma vez que, de fato, as propriedades mecânicas de compósitos reforçados por fibras naturais são inferiores ao de compósitos reforçados por fibras sintéticas. Contudo, tendo em vista as vantagens como a baixa densidade e baixo custo, é pertinente a continuidade da utilização de compósitos naturais em aplicações em que sua resistência mecânica é suficiente.

Além disso, o material do presente trabalho apresentou boas propriedades mecânicas se comparado à fibra de juta, que já vem sendo empregada em diversas aplicações. Portanto, é razoável afirmar que ele também pode ter sua utilização considerada para diferentes projetos.

Por fim, tem-se que, a partir dos dados obtidos nesse trabalho juntamente com os da literatura, podem agora serem utilizados variados critérios de falha de materiais compósitos para a resina poliéster reforçada por fibra de algodão. Isso é

fundamental principalmente em análises estáticas na fase de projeto, em que é estudado se o material utilizado suporta os esforços atuantes, assim como o estabelecimento dos fatores de segurança presentes principalmente em normas que regem projetos. Um comumente utilizado por ter boa correlação com resultados experimentais, como mostrado por Kaw (2005), é o Critério de Falha de Tsai-Wu, que leva em conta esforços normais de compressão e tração, assim como esforços cisalhantes.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, especialmente pais, avó e irmãs por todo apoio e incentivo em todos os sentidos que me foi dado. Sou grato também aos meus amigos, em especial à Gabrielly, pelo apoio e torcida de sempre. Ao meu orientador pela porta que me foi aberta para realizar essa pesquisa e pela disponibilidade e prontidão para ajudar nas atividades. Agradeço, por fim, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico(CNPq) pelo suporte financeiro à pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Al-Azad, N., Asril, M.F.M. and Shah, M.K.M., 2021. "A review on development of natural fibre composites for construction applications". *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, Vol. 9, No. 7, pp. 1–9.
- Borsoi, C., Scienza, L.C., Zattera, A.J. and Angrizani, C.C., 2011. "Obtenção e caracterização de compósitos utilizando poliestireno como matriz e resíduos de fibras de algodão da indústria têxtil como reforço". *Polímeros*, Vol. 21, pp. 271–279.
- Faruk, O., Bledzki, A.K., Fink, H.P. and Sain, M., 2014. "Progress report on natural fiber reinforced composites". *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 299, No. 1, pp. 9–26.
- Gibson, R.F., 2016. *Principles of composite material mechanics*. CRC press.
- Gowda, T.M., Naidu, A. and Chhaya, R., 1999. "Some mechanical properties of untreated jute fabric-reinforced polyester composites". *Composites Part A: applied science and manufacturing*, Vol. 30, No. 3, pp. 277–284.
- Hahn, H.T. and Williams, J.G., 1986. *Compression failure mechanisms in unidirectional composites*. ASTM International WestConshohocken, PA.
- Kaw, A., 2005. *Mechanics of Composite Materials, Second Edition*. Mechanical and Aerospace Engineering Series. Taylor & Francis. ISBN 9780849313431. URL <https://books.google.com.br/books?id=YSTKngEACAAJ>.
- Lawrence, J.M. and Advani, S.G., 2003. "Use of sensors and actuators to address flow disturbances during the resin transfer molding process". *Polymer composites*, Vol. 24, No. 2, pp. 237–248.
- Marinelli, A.L., Monteiro, M.R., Ambrósio, J.D., Branciforti, M.C., Kobayashi, M. and Nobre, A.D., 2008. "Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica". *Polímeros*, Vol. 18, pp. 92–99.
- Mattoso, L., Pereira, N., Souza, M. and Agnelli, J., 1999. "Brasília: Embrapa produção e informação". *O Agro Negócio do Sisal no Brasil*, Vol. 1, p. 161.
- Raftoyiannis, I.G., 2012. "Experimental testing of composite panels reinforced with cotton fibers".
- Rennó, Eloy, A. *et al.*, 2019. "Caracterização de compósitos poliméricos reforçados por fibra de algodão para uso automobilístico". *II Simpósio de Iniciação Científica UNIFEI*.
- Santos, A.M.d. *et al.*, 2019. "Avaliação de desempenho de tecidos quanto a proteção solar e conforto térmico".
- Shah, A. and Lakkad, S., 1981. "Mechanical properties of jute-reinforced plastics". *Fibre Science and Technology*, Vol. 15, No. 1, pp. 41–46.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

COMPRESSION AND SHEAR BEHAVIOR OF COTTON FIBER COMPOSITE AND POLYESTER MATRIX

Danilo Cordella Rodrigues, d2019014425@unifei.edu.br¹

Felipe de Souza Eloy, felipeeloy@unifei.edu.br²

¹Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá – MG

Abstract: *The aim of the present study was to study the behavior in compression and in-plane shear for the composite of cotton fiber with matrix in polyester resin, considering the stresses of the test in the longitudinal and transversal direction to the fiber. The work is relevant because it is a study that aims to obtain information not yet found in the literature about a material that meets the new demands of the market. The advantages are linked to sustainability, since the fiber is natural and, therefore, does not present the losses of discarding composites in synthetic fibers, low cost, lower density and abrasiveness than synthetic fibers and generates employment opportunities in rural areas. In addition, cotton fibers are currently the most used in the world, so it is important to understand their behavior when combined with different matrices in the case of use as a composite. For this, specimens suitable for the ASTM 3410 standard were used. The specimen for each of the two directions of the test were manufactured using the VARTM process (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding), with five laminates of 8 layers for each fiber orientation (0° and 90°). Subsequent cutting operations were carried out to obtain geometries suitable for the test standard. Compression was performed on a universal testing machine. The samples were taken to failure, and from there the data were acquired by the system that provided information about the compressive strength limit in the requested directions. The in-plane shear strength limit and the shear modulus were obtained by applying equations predicted in laminate theory and from literature data on composite tensile strength. The properties obtained were compared with those of two other composite materials, namely the unidirectional glass fiber with epoxy matrix and the jute fiber with polyester matrix. From the work, it is noted that the material has good mechanical properties, thus being promising for different applications.*

Keywords Cotton fiber, Mechanical tests, Natural composites, Compressive strength, Shear strength