Comportamento mecânico de compósitos de matriz de epóxi reforçados com fibras de espada de São Jorge (*Sansevieria Trifasciata*)

Carlos Eduardo Marques de Araújo[1], Ricardo Enrique Candia Cazon[2], Edson Roberto da Silva[3], Fabíola Medeiros da Costa[4], Nattácia Rodrigues de Araújo Felipe Rocha[4], Warley Augusto Pereira[5]

[1] Graduando do curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Rio Verde. Aluno de Iniciação Científica – PIBIC.
[2] Graduando do curso de Engenharia mecânica, Universidade de Rio Verde. Aluno de Iniciação Científica – PIVIC.
[3] Prof. Me. da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Rio Verde.
[4] Profa. Dra. da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Rio Verde.
[5] Orientador, Prof. Dr. da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Rio Verde. warley@unirv.edu.br.

Reitor:
Prof. Me. Alberto Barella Netto

Pró-Reitor de Pesquisa e Inovação:
Prof. Dr. Carlos César E. de Menezes

Editor Geral:
Prof. Dra. Andrea Sayuri Silveira Dias Terada

Editores de Seção:
Profa. Dra. Ana Paula Fontana
Prof. Dr. Hidelberto Matos Silva
Prof. Dr. Fábio Henrique Baia
Pra. Dra. Muriel Amaral Jacob
Prof. Dr. Matheus de Freitas Souza
Prof. Dr. Warley Augusto Pereira

Fomento:
Programa PIBIC/PIVIC UniRV/CNPq 2022-2023

Resumo: Compósitos são utilizados cada vez mais, principalmente na produção de veículos. As fibras vegetais apresentam um baixo custo de matéria prima e são sustentáveis, pois podem ser cultivadas e são menos agressivas ao ambiente. Assim, o objetivo desta pesquisa foi verificar o comportamento mecânico sob tração de compósitos reforçados com fibras de espada de São Jorge (*Sansevieria Trifasciata*) em matriz de epóxi. Testes de arrancamento foram realizados para determinar o comprimento crítico de adesão das fibras na resina, além da tensão cisalhante interfacial, sendo verificado um comprimento crítico de 3 mm. Os ensaios de tração nas fibras apresentaram uma alta resistência a tração com média de 183,93 MPa, que está acima da resistência da matriz de epóxi (60,5 MPa), que é o desejado para uma fibra usada em compósitos. Nos ensaios de tração dos compósitos, foram usadas duas frações volumétricas de fibra na matriz, sendo que na primeira (4,5%), verificou-se uma resistência média à tração do compósito de 46,99 MPa, já na segunda fração (9,9%) a resistência média à tração foi de 43,51 MPa. Embora a fibra tenha apresentado alta resistência à tração e boa ligação com a matriz, as frações usadas não proporcionaram um compósito de alta resistência, apresentando, na média, resistências menores que a da matriz.

Palavras-Chave: Análise estatística. Ensaio de adesão. Ensaios mecânicos. Fibra vegetal. Matriz polimérica.

Mechanical behavior of epoxy matrix composites reinforced with Mother-in-law's tongue's fibers (Sansevieria Trifasciata)

Abstract: *Composites are used more and more, mainly in the production of vehicles. Vegetable fibers have a low raw material cost and are sustainable, as they can be cultivated and are less harmful to the environment. Thus, the objective of this research was to verify the mechanical behavior under tension of composites reinforced with St. George's sword fibers (Sansevieria Trifasciata) in an epoxy matrix. Pullout tests were carried out to determine the critical length of fiber adhesion to the resin, in addition to the interfacial shear stress, with a critical length of 3 mm being found. Tensile tests on the fibers showed a high tensile strength with an average of 183.93 MPa, which is above the strength of the epoxy matrix (60.5 MPa), which is what is desired for a fiber used in composites. In the tensile tests of the composites, two volumetric fractions of fiber were used in the matrix, and in the first (4.5%), an average tensile strength of the composite was found to be 46.99 MPa, while in the second fraction (9 .9%) the average tensile strength was 43.51 MPa. Although the fiber showed high tensile strength and good bonding with the matrix, the fractions used did not provide a high-strength composite, presenting, on average, lower strengths than the matrix.*

Keywords: *Statistical analysis. Pullout test. Mechanical tests. Vegetable fiber. Polymeric matrix.*

Introdução

Devido à grande quantidade e variedade de fibras vegetais encontradas na natureza, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas para se criar novos compósitos de matriz polimérica reforçados com este tipo de fibra, principalmente nas últimas duas décadas (Monteiro *et al*., 2011). Devido à baixa densidade das fibras vegetais lignocelulósicas, compósitos com este tipo de fibra possuem normalmente uma alta relação resistência/peso, além de serem porosas, não abrasivas, possuem viscoelasticidade, são biodegradáveis, e são obtidas de fontes renováveis (Knuth *et al*., 2017). A popularidade dos compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais vem aumentando devido ao processo de fabricação mais econômico e ao seu destino não prejudicial ao meio ambiente. Devido ao uso das fibras vegetais como potencial substituto dos materiais à base de fibras sintéticas, como as de vidro e de carbono, em diversos setores de engenharia, incluindo automotivo, marítimo, aeroespacial, construção, baterias e em materiais biomédicos, as aplicações de tais compósitos têm aumentado rapidamente desde as últimas duas décadas (Saha et al., 2016).

Sansevieria trifasciata é uma planta perene comum que cresce livremente e amplamente encontrada em casas, parques e florestas (Rwawiire; Tomkova, 2016). De acordo com Adeniyi, Adeoye e Ighalo (2020), a fibra da espada de São Jorge (*Sansevieria trifasciata*) possui baixo custo, ampla disponibilidade, alta resistência específica, renovabilidade e baixa densidade, podendo ser utilizada como reforço em compósitos poliméricos. Segundo os autores, em um estudo preliminar, os compósitos reforçados com fibras de *Sansevieria trifasciata* apresentam propriedades mecânicas relativamente boas, que dependem dos métodos de processamento, fração volumétrica da fibra, comprimento da fibra e orientação da fibra. Em sua pesquisa, Rwawiire e Tomkova (2016) observaram que os testes de TGA mostraram que a fibra é estável abaixo de 200 ºC com temperatura máxima de decomposição de celulose de 315 ºC, sendo mais adequado o uso de resinas termorrígidas como matriz, visto que estas são normalmente moldadas à temperatura ambiente.

Embora tanto os polímeros termoplásticos como os termorrígidos possam ser usados como matriz em compósitos de fibras vegetais, as resinas termorrígidas são as mais comuns, visto que os termoplásticos por serem processados em altas temperaturas podem danificar as fibras vegetais que possuem temperatura de decomposição baixa (Pickering; Efendy; Le, 2015). Por possuírem baixa viscosidade, os polímeros termorrígidos podem ser introduzidos nas fibras a baixas pressões. Além destas características, as propriedades mecânicas, a boa aderência a vários tipos de fibras vegetais, além do baixo teor de umidade são fatores considerados na escolha das resinas termorrígidas (Gowda et al, 2018). Entre os polímeros termorrígidos, os mais utilizados como matriz nos compósitos com fibras são os fenólicos, os poliésteres e os epóxis.

De acordo com Revol et al. (2017), a adesão entre a fibra e a matriz é muito importante para o comportamento do compósito, pois se a adesão é forte, o material normalmente é resistente e frágil,

porém quando adesão é fraca o material será dúctil. A adesão fibra/matriz atua diretamente sobre as propriedades mecânicas e químicas do compósito. Uma baixa ligação entre a fibra e o polímero reduz a capacidade mecânica, deixando-o vulnerável a ataques ambientais que poderá enfraquecê-lo, reduzindo sua vida útil. Uma baixa aderência entre polímeros hidrofílicos e hidrofóbicos promovem baixo desempenho mecânico devido à baixa ou alta interação com a água (Sood; Dwivedi, 2017).

A pesquisa de novos materiais com o intuito de minimizar os problemas ambientais tem conduzido ao desenvolvimento de compósitos de matriz polimérica com reforço de fibras vegetais (Ishizaki et al., 2006). Assim, este trabalho propõe estudar a viabilidade, do ponto de vista de comportamento mecânico, do uso da fibra de Espada de São Jorge como reforço em compósitos de matriz polimérica.

Material e Métodos

Os materiais usados nesta pesquisa foram as fibras extraídas de folhas de Espada de São Jorge e a resina epóxi 2001 PT com endurecedor 3154 PTO da marca Redelease, com diluição de 100% de resina para 50% de endurecedor em massa, de acordo com a orientação do fabricante.

As fibras foram extraídas das folhas verdes da planta por prensagem, para a retirada da água seguida pelo desfiamento manual das folhas, lavagem e secagem à sombra.

Foram realizados testes para verificar a influência do diâmetro sobre a resistência da fibra e a influência da fração volumétrica de fibras no compósito sobre a resistência à tração dos compósitos produzidos em matriz de epóxi. Como variável de resposta, o limite de resistência à tração, nos ensaios de tração das fibras e dos compósitos. A confirmação da influência dos fatores sobre a resistência à tração foi feita a partir de uma análise de variância com nível de significância de 5%.

Primeiramente, foi medida a densidade do epóxi e das fibras de Espada de São Jorge, através do método de Arquimedes (deslocamento de líquido). Mediu-se a massa das amostras em uma balança de precisão (±0,001 g) e colocou-se cada uma dentro de uma proveta graduada com 50 ml de água. As amostras de fibras ficaram imersas na água por 24 horas para que houvesse encharcamento destas amostras (no epóxi não é necessário o encharcamento), após esse período, verificou-se o deslocamento da água (volume deslocado) dentro da proveta, sendo esse volume deslocado o próprio volume das amostras. Tendo-se a massa e o volume das amostras, realizou-se o cálculo das densidades. Para que não houvesse evaporação da água durante o período de encharcamento das fibras, as provetas foram vedadas com filme plástico. Foram feitas quatro medidas de densidade e calculada a média.

Antes dos ensaios de tração nos compósitos, foram realizadas duas etapas, sendo que na primeira, foram realizados ensaios de tração nas fibras (20 amostras) para se conhecer a resistência à tração destas. Para se determinar a área da seção transversal das fibras, mediu-se os diâmetros com um microscópio Estereoscópio Trinocular com Zoom - Nova XTD 30, com ampliação de 20x, e uma câmera digital colorida 5 MP e o software ImageJ para a medição dos diâmetros. Foi calculada a média de três medidas feitas ao longo de cada fibra, visto que as fibras possuem seções variáveis ao longo de seu comprimento. As fibras foram cortadas com comprimentos de 250 mm.

Na segunda etapa foram feitos ensaios de adesão entre a fibra e a matriz polimérica de epóxi. O teste de adesão da fibra na matriz, conhecido como ensaio pullout, é o método para se determinar o comprimento crítico da fibra na matriz (L_c), ou seja, o menor comprimento da fibra que pode ser usado para que não haja escorregamento entre a matriz e a própria fibra. Foram feitos corpos de prova onde a fibra da espada de São Jorge foi embutida em algumas profundidades diferentes na matriz de epóxi (até que fosse obtida a transição entre ruptura e escorregamento das fibras de dentro da matriz), ficando uma parte da fibra dentro da matriz e o restante de fora. Foram feitas 5 amostras para cada comprimento de embutimento da fibra dentro da matriz. Após a secagem da matriz, os corpos de prova foram tracionados. Quando a fibra escorrega da matriz, significa que não houve aderência entre elas, caso a fibra rompa sem escorregar, significa que houve aderência.

Determinado o valor de L_c, calculou-se a tensão cisalhante interfacial (τ_c) para o par fibra/matriz. A resistência na interface reforço/matriz foi determinada a partir do cálculo de τ_c, utilizando a Equação (1) (Zhou *et al.*, 2016).

$$\tau_c = \frac{\lambda . \sigma_f . A_f}{\pi . C_f} \quad (1)$$

onde: λ é um fator de segurança que varia de 0,9 a 1,0 (foi calculado o intervalo), σ_f é a resistência à tração das amostras de Espada de São Jorge, A_f e C_f são, respectivamente, a área e o perímetro médio da seção transversal dos corpos de prova usados nos ensaios de tração das fibras.

A seguir, foram feitos os corpos de prova dos compósitos. Nesta etapa, as fibras secas foram cortadas em comprimentos apropriados, de acordo com norma ASTM D3039 (2017). Os corpos de prova para ambos os tipos de ensaio foram feitos da mesma forma, obedecendo apenas as dimensões, conforme a norma para cada modalidade. As normas também definem que para cada tipo de ensaio, são necessários pelo menos 5 amostras para cada condição testada.

Os corpos de prova dos compósitos foram feitos por laminação dentro de um molde de borracha de silicone, com uso de rolo metálico ranhurado, que serve para enxarcar as fibras com a resina e ao mesmo tempo fazer a retirada das bolhas de ar formadas na resina. Após seu endurecimento as placas sólidas formadas foram cortadas em corpos de provas para os ensaios mecânicos de acordo com a norma equivalente para cada tipo de ensaio. Foram usadas duas frações (em volume) de fibras na matriz de epóxi para a confecção dos compósitos para todos os ensaios mecânicos. A primeira fração foi de 4,50% de fibra e a segunda de 9,87%.

Com os corpos de prova finalizados, a próxima etapa foi a realização dos ensaios de tração. O equipamento usado para os ensaios foi uma máquina universal de ensaios, modelo BME-20kN da Oswaldo Filizola com controle pelo software DynaView. Após os resultados obtidos nestes ensaios, foi feita a análise estatística citada anteriormente.

Resultados e Discussão

As medidas da densidade dos materiais indicou que a densidade do epóxi foi de 1,127 ± 0,300 g/cm^3, enquanto que a da fibra de Espada de São Jorge foi de 0,657 ± 0,064 g/cm^3.

A fibra possui baixa densidade o que é bastante desejável nos compósitos. A densidade da fibra de Espada de São Jorge ficou abaixo de algumas fibras vegetais estudadas como, por exemplo, a fibra de bambú com densidade de 1,03 – 1,21 g/cm^3 e a de sisal com 1,26 – 1,50 g/cm^3 (Monteiro *et al.*, 2011).

A Tabela 1 apresenta o valor médio e o desvio-padrão das propriedades mecânicas obtidas a partir dos ensaios de tração realizados na fibra de Espada de São Jorge e na resina de epóxi. Devido ao comportamento irregular sob tração da fibra vegetal, não foi possível determinar seu limite de escoamento e seu módulo de elasticidade.

Tabela 1 - Propriedades de tração da fibra de Espada de São Jorge e da matriz de epóxi

Material	Força máxima (N)	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
Fibra vegetal	2,85 ±1,87	-	183,93 ±120,17	-	1,30 ±0,77
Epóxi	2,72 ±0,27	13,72 ± 0,72	60,49 ± 2,01	2,23 ± 0,437	6,55 ± 1,11

Fonte: autoria própria

Verifica-se da Tabela 1 que a matriz de epóxi apresentou resistência à tração cerca de um terço menor que a das fibras, além de alongamento até a ruptura maior, que é justamente o que se espera nos componentes de um compósito, onde a matriz deve se alongar enquanto o reforço sofre os esforços de tração e quando a fibra se rompe o compósito deve entrar em colapso.

A análise de variância mostrou que o diâmetro afetou significativamente a resistência à tração da fibra. Isso ocorre devido a defeitos na estrutura das microfibrilas de celulose associados a falhas apresentadas na estrutura irregular ao longo das fibras. Assim, a probabilidade de falha devido a algum concentrador de tensão causado por uma irregularidade da estrutura da fibra é maior quando a área superficial da fibra é maior (diâmetros maiores) (Callister, 2018).

Nos ensaios de arrancamento da fibra de Espada de São Jorge da matriz de epóxi, com o embutimento de 1 mm, das cinco amostras testadas, houve escorregamento em quatro e uma se rompeu com limite de resistência médio de 160,23 ± 139,25 MPa. A seguir foi feito um embutimento de 3 mm onde, das cinco amostras, houve o escorregamento em duas e três foram rompidas com limite de resistência médio de 136,01 ± 43,73 MPa. Por fim, com o embutimento de 5 mm todas as amostras se romperam, com limite de resistência médio de 137,89 ± 112,07 MPa.

A Figura 1 apresenta o gráfico obtido para a determinação do comprimento crítico (L_c).

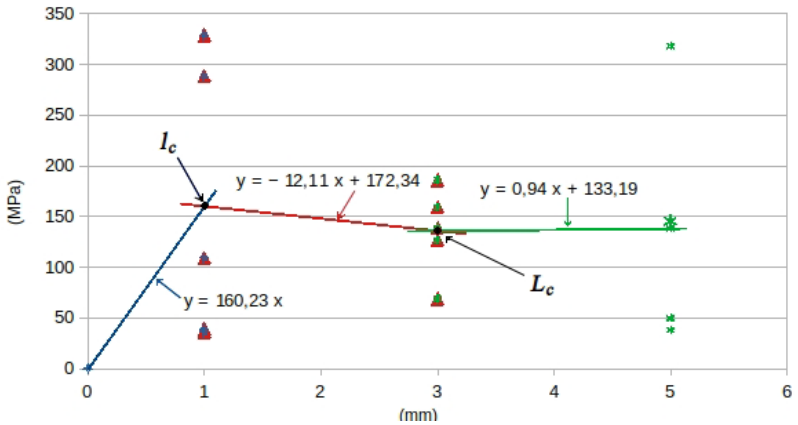

Figura 1 - Curvas de *pullout*: comprimento embutido (mm) x tensão de tração (MPa)
Fonte: autoria própria

Para se determinar o comprimento crítico a partir da Figura 1, utilizou-se o método de três curvas, proposta por Monteiro e D'Almeida (2006). A primeira curva da figura, que se inicia na origem, representa os pontos onde a fibra se desacopla da matriz, neste caso, valores menores ou iguais a 1 mm de profundidade. A segunda curva representa embutimentos onde pode ocorrer tanto escorregamento como ruptura das fibras (1 - 3 mm). A terceira curva representa o intervalo em que não há mais desacoplamento entre a fibra e a matriz (acima de 3 mm). A figura também mostra dois pontos críticos, sendo l_c, que é o comprimento crítico para livre desacoplamento da fibra, determinado pela intersecção das duas primeiras curvas e L_c, que é comprimento a partir do qual não ocorre mais desacoplamento da fibra de dentro da matriz, determinado pela intersecção das duas últimas curvas. Da intersecção das últimas duas curvas determinou-se L_c de 3,00 mm.

Determinado o valor de L_c, calculou-se o valor da tensão cisalhante interfacial τ_c a partir da Equação (1), encontrando-se o intervalo: τ_c = 2,48 a 2,75 MPa. Esses valores são baixos comparado com outros sistemas epóxi/fibra vegetal como, por exemplo, o sistema epóxi/folha de buriti com τ_c = 20 Mpa (Pereira *et al*., 2021) e o sistema epóxi/sisal, com τ_c = 15,5 Mpa (Zhang *et al*., 2020). Existem vários fatores físicos e químicos característicos de cada par que podem influenciar a ligação fibra/matriz, incluindo as características polares dos componentes, a morfologia da interface, a energia da superfície e os fenômenos de molhabilidade (Ariawan *et al.*, 2017).

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de tração dos compósitos epóxi/fibra de Espada de São Jorge. São apresentados os valores médios e o desvio padrão das propriedades mecânicas de cinco amostras para cada fração volumétrica. Foram feitas duas frações em volume de fibra na matriz, sendo a primeira fração com 4,5% de reforço e a segunda com 9,87%.

Tabela 2 - Propriedades de tração do compósito de Espada de São Jorge e matriz de epóxi para uma e duas frações

Fração de fibra (%)	Força máxima (N)	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
4,5	1127 ± 170	13,88 ± 3,42	46,99 ± 7,92	0,504 ± 0,098	5,22 ± 0,68
9,87	620 ± 90	21,43 ± 8,25	43,51 ± 8,40	0,892 ± 0,137	3,86 ± 0,50

Fonte: autoria própria

Observa-se na Tabela 3 que para a segunda fração, com maior teor de fibras, há uma elevação na rigidez dos compósitos, evidenciado pela elevação do limite de escoamento e do módulo de elasticidade, além da redução do alongamento, embora tenha tido uma pequena redução (7,4%) da resistência à tração, mas dentro da margem de erro das duas frações. Essa elevação da rigidez é o que se espera quando se adiciona o reforço, normalmente mais rígido que a matriz polimérica. Entretanto, a resistência à tração dos compósitos ficou menor que a do epóxi (Tabela 1).

A análise de variância mostrou que não houve uma influência significativa (5%) da variação da fração de fibra sobre a resistência à tração e o limite de escoamento, mas houve influência sobre o módulo de elasticidade e o alongamento na ruptura.

Conclusão

Com os resultados obtidos pode-se concluir que a fibra de espada de São Jorge, possui baixa densidade e uma elevada resistência à tração para uma fibra vegetal. Embora o comprimento crítico de embutimento seja de apenas 3 mm, a tensão cisalhante interfacial ficou abaixo daquelas encontradas em outras fibras vegetais, o que evidencia uma possível fraca ligação entre a fibra e a matriz. A elevação da fração volumétrica de fibra melhora a rigidez do compósito, embora não tenha alterado significativamente a resistência à tração. O compósito apresentou resistência à tração inferior à da matriz de epóxi, mas é possível que com frações maiores que as usadas haja uma elevação nas propriedades de tração dos compósitos, fazendo com que a resistência do compósito seja maior que a da matriz, como é esperado em todo compósito reforçado por fibras longas.

Agradecimentos

Ao CNPq pela concessão de bolsa e ao Programa de Iniciação Científica da Universidade de Rio Verde.

Referências Bibliográficas

ADENIYI, A. G.; ADEOYE, S. A.; IGHALO, J. O. Sansevieria Trifasciata Fibre and Composites: A Review of Recent Developments. **International Polymer Processing**, V. 35(4): 344-354, 2020.

ARIAWAN, D.; ISHAK, Z. A. M.; SALIM, M. S.; TAIB, R. M.; THIRMIZIR, M. Z. A. Wettability and interfacial characterization of alkaline treated kenaf fiber-unsaturated polyester composites fabricated by resin transfer molding. **Polymer Composites**, v. 38, issue 3, pp. 507-515, 2017.

ASTM D3039/D3039M:17, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, West Conshohocken, PA, United States, ASTM International, 2017.

CALLISTER JR. W.D., RETHWISCH, D.G. **Ciência e Engenharia de Materiais - uma Introdução**, 9 ed, Rio de Janeiro, LTC, 2018.

GOWDA, T.G.Y., SANJAY, M.R., BHAT, K.S., et al. Polymer matrix-natural fiber composites: an overview. **Cogent Engineering**, v. 5, n. 1, pp. 1-13, 2018.

ISHIZAKI, M. H.; VISCONTE, L. L. Y.; FURTADO, C. R. G. et al. Caracterização mecânica e morfológica de compósitos de polipropileno e fibras de coco verde: influência do teor de fibra e das condições de mistura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 16, n° 3, p. 182-186, 2006.

MONTEIRO, S. N.; D'ALMEIDA, J. R. M. Ensaios de Pullout em Fibras Lignocelulósicas – Uma Metodologia de Análise. **Revista Matéria**, v. 11, n. 3, pp. 189-196, 2006.

MONTEIRO, S. N.; LOPES, F. P. D.; BARBOSA, A. P.; BEVITORI, A. B.; DA SILVA, I. L. A; DA COSTA, L. L. Natural lignocellulosic fibers as engineering materials – an overview. **The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International**, v. 42A, pp. 2963-2974, 2011.

PEREIRA, A. P.; CERON, I.; SILVA, M. S.; FREITAS, M. P. C,; SILVA, E. R. COSTA, F. M. Desenvolvimento de compósitos poliméricos reforçados com fibra da folha do buriti. **Revista Matéria**, v.26, n.1, 2021.

PICKERING, K. L., EFENDY, M. G. A., LE, T. M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Composites: Part A**, v. 83, pp. 98–112, 2015.

RWAWIIRE, S.; TOMKOVA, B. Morphological, thermal, and mechanical characterization of sansevieria trifasciata fibers. **Journal of Natural Fibers**, 12:201–210, 2015.

REVOL. B.P., THOMASSEY, M., RUCH, F., et al. Single fibre model composite: Interfacial shear strength measurements between reactive polyamide-6 and cellulosic or glass fibres by microdroplet pullout test. **Composites Science and Technology**, v. 148, pp. 9-19, 2017.

SAHA, P., CHOWDHURY, S., ROY, D., ADHIKARI, B.; KIM, J. K.; THOMAS, S. A brief review on the chemical modifications of lignocellulosic fibers for durable engineering composites. **Polymer Bulletin**, v. 73, issue 2, pp. 587–620, 2016.

SOOD, M., DWIVEDI, G. Effect of fiber treatment on flexural properties of natural fiber reinforced composites: A review. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 27, pp. 775–783, 2017.

ZHANG, Z., LI, Y., FU, K., Li, Q. Determination of interfacial properties of cellulose nanocrystal-modified sisal fibre in epoxy by cyclic single-fibre pull-out. **Composites Science and Technology**, v. 193, pp. 1-8, 2020.

ZHOU, J.; LI, Y.; LI, N.; HAO, X.; LIU. C. Interfacial shear strength of microwave processed carbon fiber/epoxy composites characterized by an improved fiber-bundle pull-out test. **Composites Science and Technology**, v. 133, pp. 173-183, 2016.