XVII CICURV
Congresso de Iniciação Científica da Universidade de Rio Verde

Comportamento mecânico de compósitos poliméricos reforçados com polietileno de alta densidade

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[5], Warley Augusto Pereira[6]

[1] Graduando do curso de Engenharia Mecânica, 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. Ma. da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Rio Verde.
[5] Profa. Dra. da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Rio Verde.
[6] 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. Dr. Fábio Henrique Baia

Editor de Seção:
Prof. Dr. Warley Augusto Pereira

Correspondência:
Carlos Eduardo Marques de Araújo

Fomento:
Programa PIBIC/PIVIC UniRV/ CNPq 2021-2022

Resumo: Materiais compósitos vêm cada vez mais sendo usados, principalmente em veículos, na fabricação de peças e carrocerias. Assim, o objetivo desse trabalho foi verificar as propriedades mecânicas de tração de um compósito com matriz de epóxi e reforço de fibras trançadas de polietileno de alta densidade (TyveK®), material forte, resistente ao rasgo, perfuração e água e leve. Para este estudo, foi realizado um planejamento fatorial com dois fatores para verificar a influência da gramatura da fibra (68 g/m^2 e 97 g/m^2) e de sua concentração (camada simples e camada dupla) sobre a resistência à tração do compósito. Antes foram realizados ensaios de arranchamento para determinar o comprimento crítico da fibra. Os ensaios de arrancamento determinaram um comprimento crítico de 1 mm para ambas gramaturas. Os ensaios de tração no TyveK® mostraram uma maior resistência da fibra de gramatura 97 g/m^2. Nos ensaios dos compósitos, a análise de variância não demonstrou influência significativa tanto da gramatura quando do número de camadas sobre a resistência à tração. Para a gramatura 68 g/m2 (68g) o compósito com uma camada apresentou resistência à tração 25,3% superior ao de duas camadas. Entretanto para o de gramatura 97 g/m^2 (97g) o compósito com uma camada apresentou resistência à tração 12,3% inferior ao de duas camadas. Comparando-se entre as duas gramaturas, para uma camada o compósito com a fibra 68g apresentou resistência à tração de 4,9% superior a de 97g, para duas camadas o compósito com fibra 68g apresentou resistência à tração 31,1% inferior a de 97g.

Palavras-chave: TyveK®. Fibra polimérica. Propriedades mecânicas. Matriz polimérica. Ensaio de arrancamento.

Mechanical behavior of high density polyethylene reinforced polymeric composites

Abstract: Composite materials are increasingly being used, mainly in vehicles, in the manufacture of parts and bodies. Thus, the objective of this work was to

UniRV
Universidade de Rio Verde

verify the mechanical tensile properties of a composite with an epoxy matrix reinforced with high density polyethylene braided fibers (TyveK®), a strong material, resistant to tearing, perforation and water, and slight. For this study, a factorial design with two factors was carried out to verify the influence of fiber grammage (68 g/m^2 and 97 g/m^2) and its concentration (single layer and double layer) on the tensile strength of the composite. Pullout tests were carried out beforehand to determine the critical fiber length. The pullout tests determined a critical length of 1 mm for both weights. Tensile tests on TyveK® showed a higher strength of the fiber of grammage 97 g/m^2. In the tests of composites, the analysis of variance showed no significant influence of both the weight and the number of layers on the tensile strength. For the grammage of 68 g/m^2 (68g) the composite with one layer showed tensile strength 25.3% higher than that of two layers. However, for the one with grammage of 97 gm^2 (97g) the composite with one layer showed tensile strength 12.3% lower than the one with two layers. Comparing the two grammage, for one layer the composite with the 68g fiber showed tensile strength of 4.9% higher than that of 97g, for two layers the composite with the 68g fiber showed tensile strength 31.1% lower than that of 97g.

Key words: TyveK®. Polymeric fiber. Mechanical properties. Polymeric matrix. Pullout test.

Introdução

Os compósitos poliméricos reforçados com fibra ainda são uma classe emergente de materiais de engenharia. Eles incluem uma ampla gama de tipos geralmente agrupados de acordo com a aparência das fibras de reforço e características da matriz (termoplásticos ou termofixos), respectivamente. Compósitos poliméricos reforçados com fibra têm sido amplamente empregados em muitas aplicações estruturais devido ao seu baixo peso e propriedades mecânicas superiores (KARGER-KOCSIS et al., 2015).

De acordo com a fabricante DuPont (2021), o TyveK® é um não-tecido tipo TNT, composto por fibras de polietileno trançado de alta densidade (PEAD). É conhecido no mercado por ser um material mais leve que o papel, muito flexível, por ser um termoplástico é reciclável, fácil de moldar e resistente ao rasgo, embora seja fácil de ser cortado com lâminas de facas e tesouras, também é resistente a furos, à água, e a radiações UV, além de ser resistente a substâncias químicas. As aplicações mais comuns do TyveK® é em isolamentos contra umidade de casas e prédios, em embalagens médicas, em vestuário e mascaras de proteção (EPIs), além de outras. Embora seja impermeável à água em estado líquido, vapor de água consegue passar através deste material. Estas propriedades fazem o TyveK® um material bastante versátil e útil em diversas aplicações.

Nos compósitos de matriz polimérica é comum o uso de polímeros termoplásticos e termofixos, sendo estes últimos os mais empregados, onde os poliésteres, os epóxis e os fenólicos são os mais utilizados. A baixa viscosidade dos polímeros termofixos é sua principal vantagem, além disso, por ser uma resina líquida com cura química ou por luz, podem ser moldados a baixas pressões. A alta capacidade de adesão a vários tipos de reforços, além das características mecânicas, e o baixo teor de umidade, são atributos considerados na escolha das resinas termofixas. Diferente dos termoplásticos, as resinas termofixas normalmente são processadas em baixas temperaturas, provocando menos danos aos reforços menos resistentes ao calor, principalmente os vegetais e aqueles produzidos a partir de polímeros termoplásticos (PICKERING et al., 2015).

Para se poder interpretar corretamente as propriedades mecânicas dos compósitos, deve-se primeiramente caracterizar o comportamento de adesão entre a fibra e a matriz. Para a análise de compósitos como os reforçados por fibra de vidro ou carbono, existem alguns ensaios que podem aplicados para esse fim, sendo o de arrancamento (pullout test) um dos mais simples e mais aplicados para se determinar a tensão de cisalhamento interfacial, necessária para romper a interface fibra/matriz do compósito (ZHOU et al., 2016).

O processo de moldagem, assim como as dimensões e a concentração dos reforços, além da afinidade entre a matriz polimérica e o reforço em compósitos, promovem vários tipos de modificações no compósito (BARBOSA, 2011). Sendo assim, este trabalho propõe a criação de compósitos reforçados com folha de fibra de polietileno trançado de alta densidade (TyveK®) e o estudo de seu comportamento mecânico com relação à sua gramatura (espessura) e à sua concentração na matriz polimérica de epóxi.

Material e Métodos

Neste trabalho foram realizados testes para verificar a influência da espessura e da concentração do reforço sobre a resistência à tração de compósitos

produzidos com matriz de epóxi reforçada com fibra de polietileno de alta densidade conhecido como Tyvek®. Em testes paralelos foram determinadas a densidade do reforço e a adesão entre a fibra e a matriz (comprimento crítico de adesão).

Para conseguir verificar essas influências, foi feito um planejamento fatorial de dois fatores com dois níveis de gramatura das folhas do TyveK® (68 g/m^2 e 97 g/m^2, nomeados pelo fornecedor como 68g e 97g, respectivamente) e dois níveis de concentração do reforço no compósito, que foi definida por camadas (uma e duas camadas de reforço) e depois calculada a fração volumétrica em função das densidades do reforço e da matriz. Foram usadas cinco réplicas para cada combinação de fatores. Como variável de resposta, o limite de resistência à tração. A confirmação da influência dos parâmetros sobre a resistência à tração foi feita a partir de uma análise de variância (ANOVA), com nível de significância de 5%. Uma tentativa para verificar a resistência ao dobramento foi feita, mas devido à alta flexibilidade do compósito criado, não foi possível dobrar os corpos de prova até a ruptura, pois o deslocamento necessário para isso ultrapassou a capacidade de deslocamento do cutelo da máquina sem atingir sua base.

Antes de serem realizados os testes de resistência, foi medida a densidade das fibras de polietileno de alta densidade (Tyvek®), para esta medida foi cortada uma folha da fibra de cada gramatura usada nesta pesquisa e, com um paquímetro, foram medidas a largura, o comprimento e a espessura das folhas para determinar seu volume e depois se pesou estas folhas em uma balança de precisão. As densidades foram medidas para que fossem determinadas com maior precisão as frações volumétricas usadas na confecção dos corpos de prova para os ensaios mecânicos. A densidade do epóxi utilizado já foi determinada em pesquisas anteriores.

A próxima etapa foram os testes de arrancamento entre as fibras (tiras da manta de Tyvek®) e a matriz polimérica de epóxi. O teste de arrancamento da fibra na matriz (ensaio *pullout*) é o processo para 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. Nesta etapa, foram feitos corpos de prova onde as fibras estudadas foram embutidas, começando em 5 mm de profundidade. Como nesta profundidade houve ruptura da fibra antes do arrancamento, a profundidade de embutimento foi reduzida até que houvesse uma transição entre escorregamento e ruptura da fibra embutida, podendo-se, a partir desta transição, determinar o valor do comprimento crítico da fibra na matriz. Foram feitos cinco testes com cada profundidade de embutimento em cada gramatura da fibra usada nesta pesquisa.

Determinado o valor de lc, calculou-se a tensão cisalhante interfacial (τ_c) para cada par fibra/resina. A resistência na interface reforço/matriz foi determinada a partir do cálculo de τ_{c1}, utilizando a Equação (1) (ZHOU, 2016).

$$T_c = \frac{(\lambda \,.\, \sigma_f \,.\, A_f)}{(C_f \,.\, l_c)} \qquad (1)$$

onde: λ é um fator de segurança que varia de 0,9 a 1,0 (foi usado o valor médio 0,95), σ_f é a resistência à tração das amostras de TyveK® (68g e 97g), A_f e C_f são, respectivamente, a área e o perímetro da seção transversal dos corpos de prova usados nos ensaios de tração das fibras.

Para a confecção dos corpos de prova dos compósitos, foi usada a resina epóxi 2001 PT e endurecedor 3154BB da marca Redelease, com diluição de 100% de resina para 50% de endurecedor em massa, conforme orientação do fabricante. Após a preparação da resina, as mantas de TyveK® foram impregnadas de epóxi formando-se prepregs e, após seu endurecimento, as placas sólidas formadas foram cortadas em corpos de provas para os ensaios mecânicos de acordo com a norma ASTM D3039/D3039M:17 (ensaio de tração para polímeros e compósitos).

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

Os valores médios das densidades das fibras e das resinas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Densidade das fibras e da matriz polimérica

Material	Densidade (g/cm^3)
TyveK® 68 g/m^2	0,329 ± 0,002
TyveK® 97 g/m^2	0,369 ± 0,003
Epóxi	1,130 ± 0,300

Fonte: autoria própria

A Tabela 1 mostra que as fibras possuem baixa densidade o que é bastante desejável nos compó-

sitos que geralmente são usados em substutuição aos metais, normalmente mais pesados.
A Tabela 2 apresenta os valores médios e os desvios-padrão das propriedades mecânicas obtidas a partir dos ensaios de tração realizados nas fibras de TyveK® (68 g/m² e 97 g/m²) e na resina de epóxi.

Tabela 2 - Propriedades de tração das folhas de TyveK® e da matriz de epóxi

Material	Força máxima (N)	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
TyveK® 68 g/m²	79,2 ± 7,7	6,98 ± 0,9	26,07 ± 2,5	0,160 ± 0,07	37,4 ± 11,0
TyveK® 97 g/m²	157,0 ± 27,4	4,54 ± 1,2	41,18 ± 7,1	0,176 ± 0,02	54,5 ± 10,8
Epóxi	2,7 ±0,3	13,7 ± 0,7	60,5 ± 2	2,228 ± 0,4	6,6 ± 1,1

Fonte: autoria própria

Os resultados apresentados na Tabela 2 mostraram que o reforço de gramatura 97g/m² apresentou resistência à tração e módulo de elasticidade maiores que a fibra de gramatura 68 g/m², porém com menor tensão de escoamento. Outra observação que pode ser feita a partir da Tabela 2 é que a matriz de epóxi apresentou resistência à tração superior à das fibras, além de alongamento até a ruptura menor, que é o contrário que se espera de um compósito, onde a matriz normalmente deve ter alongamento maior que os reforços e resistência à tração menor ou igual.
Nos ensaios de arrancamento da folha de TyveK® 68g na matriz de epóxi, houve ruptura em todos os corpos de prova com o embutimento de 1 mm, sendo este o menor valor conseguido devido à impossibilidade de se embutir comprimentos menores que este. Assim, considerou-se esse valor como o comprimento crítico, ou seja, l_c = 1,0 mm. No caso da folha de TyveK® 97g, os resultados dos ensaios estão na Tabela3, onde são apresentados os valores médios e o desvio padrão do limite de resistência à tração de cinco réplicas para cada comprimento embutido.

Tabela 3 - Ensaios de arrancamento das folhas de TyveK® em matriz de epóxi

Comprimento embutido (mm)	Tensão de tração (MPa)	Resultado
1	34,8 ± 5,4	Ruptura/Escorregamento
2	38,0 ± 3,9	Ruptura
5	48,8 ± 7,7	Ruptura

Fonte: autoria própria

Para se determinar o comprimento crítico de embutimento da folha de TyveK® 97g em epóxi, foi feito um gráfico, de acordo com a metodologia de Monteiro e D'Almeida (2006). A Figura 1 apresenta o gráfico obtido para a determinação do comprimento crítico.

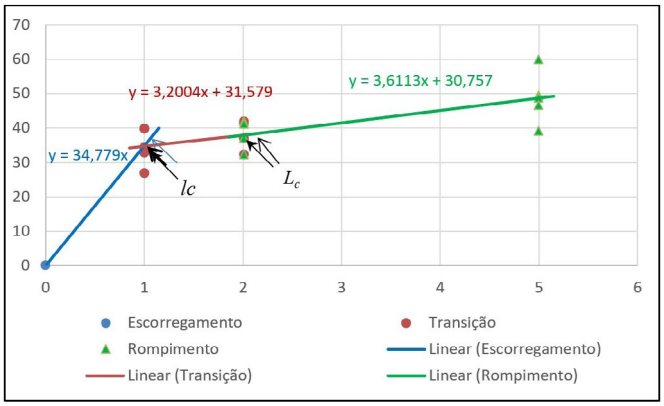

Figura 1 - Comprimento embutido x tensão de tração e para curvas de *pullout* em folhas de TyveK® 97g embutidas em matriz de epóxi
Fonte: autoria própria

Para se determinar o comprimento crítico l_c a partir da Figura 1, utilizou-se a metodologia com três curvas, proposta por Monteiro e D'Almeida (2006). Na figura, a primeira curva começa na origem, seguindo até encontrar os pontos onde a fibra começou a se desacoplar (debonding) da matriz, neste caso, dos cinco testes, houve desacoplamento em dois e ruptura em três. A segunda curva começa de onde terminou a primeira e vai até o ponto onde não há mais desacoplamento da fibra de entro da matriz, e a terceira representa o intervalo onde não há mais desacoplamento entre a fibra e a matriz. A figura mostra dois comprimentos críticos, sendo *lc* o comprimento crítico para livre desacoplamento da fibra (comprimento crítico de interesse), determinado pela intersecção das duas primeiras curvas a partir da origem, e L_c, o comprimento a partir do qual a fibra não desacopla mais da matriz, que é a intersecção entre a curva central e a curva mais à direita no gráfico. Neste caso, para os ensaios com a folha de TyveK® 97g, obteve-se, a partir da intersecção das curvas da Figura 1, o valor de *lc* = 1,0 mm.
Os valores de τ_c calculados a partir da Equação (1) são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Tensão cisalhante interfacial entre os pares TyveK® 68g/epóxi e TyveK® 97g/epóxi

Material	Tensão máxima (MPa)	Espessura (mm)	Largura (mm)	l_c (mm)	τ_c (MPa)
TyveK® 68 g/m²	26,07 ± 2,5	0,20 ± 0,05	15,19 ± 0,19	1,0 ± 0,05	2,44 ± 0,23
TyveK® 97 g/m²	41,18 ± 7,1	0,25 ± 0,05	15,27 ± 0,19	1,0 ± 0,05	4,81 ± 0,83

Fonte: autoria própria

A tensão cisalhante interfacial do par TyveK® 97g/epóxi ficou 1,97 vezes maior que a do par TyveK® 68g/epóxi devido à maior resistência à tração nos ensaios de arrancamento e à maior relação área/perímetro da seção transversal, visto que o comprimento crítico foi igual para ambos os casos. Como comparação com as duas principais fibras usadas em compósitos poliméricos, τ_C = 43,7 ± 4,8 MPa, para o par fibra de carbono/epóxi (ZHOU et al., 2016) e τ_C = 57,0 ± 15 MPa, para o par fibra de vidro/epóxi (GODARA et al., 2010).

Este menor valor da tensão cisalhante interfacial do compósito Tyvek®/epóxi, quando comparado aos compósitos de epóxi com fibra de carbono e de vidro, provavelmente se deve aos altos níveis de alongamento do TyveK® (ver Tabela 2) com relação ao do epóxi, pois, como o volume da amostra testada não varia durante o teste de arrancamento, um alongamento significa uma redução da seção transversal da amostra (espessura e largura), fazendo com que a fibra desacople da matriz de epóxi em menores valores de τ_C.

A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios de tração dos compósitos de epóxi/Tyvek®. São apresentados os valores médios e o desvio padrão das propriedades mecânicas de cinco amostras para cada fração volumétrica. Foram feitas duas frações de cada gramatura do reforço, sendo que o compósito de TyveK® 68g teve 2,9% de reforço na primeira fração e 13,5% na segunda. O compósito de TyveK® 97g foi feito com 4,3% de reforço na primeira fração e 19% na segunda.

Tabela 5 - Propriedades de tração do compósito TyveK®/epóxi para uma e duas frações

Material	Força máxima (N)	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
TyveK® 68 g/m² (1ª fração)	982,2 ± 140,1	12,76 ± 1,9	20,99 ± 3,8	0,711 ± 0,14	3,64 ± 0,44
TyveK® 68 g/m² (2ª fração)	456,2 ± 29,4	7,84 ± 1,91	15,68 ± 5,7	0,390 ± 0,11	10,15 ± 7,05
TyveK® 97 g/m² (1ª fração)	943,4 ± 202,0	11,30 ± 1,8	19,96 ± 3,1	0,579 ± 0,09	4,71 ± 1,27
TyveK® 97 g/m² (2ª fração)	577,8 ± 102,9	17,33 ± 3,7	22,76 ± 4,8	0,415 ± 0,10	12,16 ± 7,18

Fonte: autoria própria

A análise de variância não apresentou influência significativa da espessura e da fração volumétrica da fibra sobre a resistência à tração dos compósitos criados. Porém, da superfície de resposta (Figura 2), verificou-se o comportamento da resistência à tração em função dos dois fatores analisados.

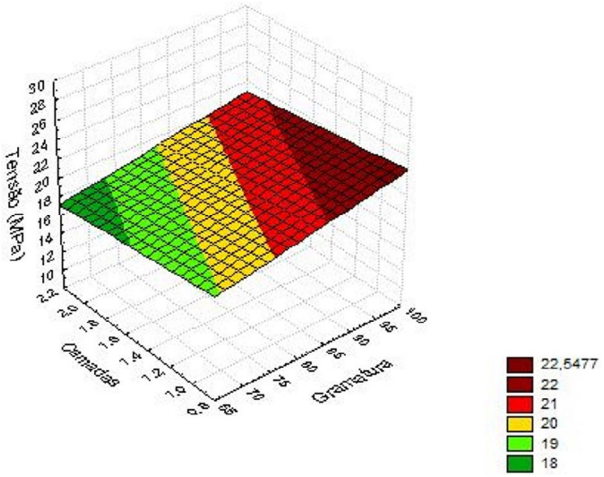

Figura 2 – Superfície de resposta da influência da gramatura e do número de camadas sobre a resistência à tração dos compósitos
Fonte: autoria própria

O gráfico mostra uma tendência de elevação da resistência à tração com o aumento da gramatura da fibra. Esse comportamento se deve, provavelmente, pelo maior valor de resistência à tração da fibra TyveK® 97g quando comparado ao da fibra TyveK® 68g, observado na Tabela 2. No caso do efeito do número de camadas, a tendência é de uma ligeira elevação da resistência com a redução do número de camadas.

O aumento da fração volumétrica da fibra de TyveK® 68g promoveu uma redução em todos os parâmetros de tração, com exceção ao alongamento, indicando que, provavelmente, o aumento da quantidade de fibra reduziu o efeito da matriz de epóxi, mais resistente.

No caso da fibra de TyveK® 97g, o aumento da fração volumétrica promoveu uma elevação na tenacidade do compósito, o que pode ser observado pela elevação dos limites de escoamento e de resistência à tração, além do aumento do alongamento até a ruptura. Porém, com uma redução no módulo de elasticidade, devido ao maior volume da fibra, mais dúctil que a matriz. Essa elevação dos limites de escoamento e de resistência à tração com o aumento da fração volumétrica da fibra é o que se espera em um compósito. No caso desta gramatura, como a resistência desta fibra não está tão abaixo da resistência da matriz do epóxi, como no caso da fibra 68g, a tendência de redução da resistência com a elevação da fração volumétrica não ocorreu.

Conclusão

A fibra de TyveK® possui uma baixa densidade e apresentou um alto nível de adesão à resina epóxi,

com comprimento crítico de 1,0 mm para ambas as gramaturas.
A fibra TyveK® 97g apresentou maiores resistência à tração (36,7%), módulo de elasticidade (9,1%) e alongamento (31,4%) que a fibra TyveK® 68g, porém com menor limite de escoamento (35%). A matriz de epóxi possui valores de resistência e de módulo de elasticidade maiores que as fibras, mas com alongamento menor.
A análise de variância não mostrou influência significativa da gramatura da fibra e do número de camadas de fibra no compósito sobre sua resistência à tração. Entretanto, a análise da curva de superfície de resposta mostrou uma tendência de elevação da resistência à tração com o aumento da gramatura da fibra e de uma ligeira elevação da resistência com a redução do número de camadas. Para a gramatura 68 g/m^2 o compósito com uma camada apresentou resistência à tração 25,3% superior ao de duas camadas. Para o de gramatura 97 g/m^2 o compósito com uma camada apresentou resistência à tração 12,3% inferior ao de duas camadas.
Os resultados mostraram que os compósitos com fibra de gramatura 68 g/m^2 apresentaram uma resistência à tração 4,9% maior que o de 97 g/m^2 em camada única e 31,1% menor em cama dupla.
A alta plasticidade das fibras limita a sua utilização como material de reforço em compósitos poliméricos.

Agradecimentos

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

Referências Bibliográficas

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

BARBOSA, A. P. Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de buriti. 2011. 141f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2011.

DUPONT. O que é o Tyvek®? Não paginado. Disponível em: https://www.dupont.com.br/tyvek/what-is-tyvek.html. Acesso em: 23 março 2021.

GODARA, A., GORBATIKH, L., KALINKA, G., et al. Interfacial shear strength of a glass fiber/epoxy bonding in composites modified with carbon nanotubes. Composites Science and Technology, 70(9), 1346–1352. 2010.

KARGER-KOCSIS, J.; MAHMOOD, H.; PEGORETTI, A. Recent advances in fiber/matrix interphase engineering for polymer composites. Progress in Materials Science, n. 73, pp. 1–43, 2015.

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, Set. 2006.

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, Sep. 2015.

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, p. 173-183, 2016.