

ENSAIO DE FLEXÃO EM COMPÓSITOS DE EPÓXI REFORÇADOS COM FIBRAS DE MALVA *

Lucio Fabio Cassiano Nascimento¹
Sérgio Neves Monteiro²
Luana Demosthenes³
Ulisses Oliveira Costa⁴

Resumo

As fibras de malva (*Urena lobata, linn*) demonstram grande potencial na utilização como reforço em compósitos de matriz polimérica. Neste trabalho foram produzidos compósitos de epóxi com fibras de malva, nas frações volumétricas de 0%, 10%, 20% e 30%, com o objetivo de investigar a resistência e o módulo de flexão. Para a análise desses parâmetros foi aplicado a análise de variância (ANOVA) e o Teste de Tukey, a partir do qual pôde-se afirmar, com um nível de confiança de 95%, que os corpos de prova de epóxi reforçados com 30% de fibras de malva, tiveram o melhor desempenho, atingindo 191,27 MPa e 10,9 GPa, respectivamente para a resistência a flexão máxima e módulo de elasticidade em flexão.

Palavras-chave: Fibras de Malva; Epóxi; Resistência a Flexão; Módulo de Elasticidade.

FLEXION TEST ON EPOXY COMPOSITES REINFORCED WITH MALLOW FIBERS

Abstract

The mallow fibers (*Urena lobata, linn*) demonstrate great potential in the use as reinforcement in polymer matrix composites. In this work, epoxy composites with mauve fibers were produced in the volumetric fractions of 0%, 10%, 20% and 30%, in order to investigate the resistance and flexural modulus. For the analysis of these parameters, the analysis of variance (ANOVA) and the Tukey's test were applied, from which it was possible to state, with a confidence level of 95%, that the epoxy test bodies reinforced with 30% of fibers, had the best performance, reaching 191.27 MPa and 10.9 GPa, respectively for maximum flexural strength and modulus of elasticity in flexion.

Keywords: Mallow Fibers; Epoxy; Flexural Strength; Modulus of elasticity.

¹ Engenheiro Metalurgista, D.C, Professor Titular, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. lucio_coppe@yahoo.com.br.

² Engenheiro Metalurgista, Ph.D, Professor Titular, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³ Engenheira Civil, Mestranda em Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

⁴ Engenheiro de Materiais, Mestrando em Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Ao contrário das fibras sintéticas, as fibras naturais lignocelulósicas (FNLs) não possuem propriedades uniformes, pois são microestruturalmente heterogêneas e têm limitação dimensional. Uma mesma espécie de FNL pode ter suas propriedades afetadas consideravelmente dependendo da sua origem, qualidade e idade da planta, diâmetro da fibra, razão de aspecto e seu pré-condicionamento [1].

Em se tratando de compósitos com fibras contínuas e alinhadas, as características mecânicas dependem de vários fatores, incluindo os comportamentos tensão deformação das fases presentes, as frações volumétricas dessas fases e a direção na qual a tensão ou carga é aplicada. [2]

A fibra de malva (*Urena lobata, linn*) embora muito utilizada para a confecção de cordoaria em geral, tapetes, papel-moeda, artesanato e outras várias finalidades, ainda não possui grande utilização como componente de reforço em produtos industrializados. No entanto, propriedades físicas e mecânicas como resistência a tração, módulo de elasticidade e energia de impacto [3], demonstram grande potencial na utilização destas fibras como reforço em compósitos de matriz polimérica (CFNLs). Na Tabela 1 são mostradas algumas dessas propriedades.

Tabela 1. Propriedades físicas e mecânicas das fibras de malva *Fonte: Adaptado [3].*

	Diâmetro (μm)	Comp. (mm)	Massa Específica (kg/m^3)	Absorção máxima (%)	Resistênci a a tração (MPa)	Along. a ruptura (%)	Mód. de elasticidad e (GPa)
Malva	42,6	23,8	1374	377	160	5,2	17,4

Neste contexto, destaca-se a possibilidade de utilização de CFNLs em aplicações dinâmicas. Portanto, torna-se fundamental a análise de propriedades quando os corpos de prova são submetidos a esforços mecânicos, como por exemplo, flexão em três pontos.

O objetivo deste estudo consiste na fabricação de compósitos epóxi reforçados com fibras de malva, nas frações volumétricas de 0%, 10%, 20% e 30% v/v de fibras. De modo a encontrar a resistência e o módulo de elasticidade em flexão dos CFLNs, mostrando a relação dos valores obtidos com a fração volumétrica de fibras de malva; Para isto os compósitos serão cortados e o ensaio de flexão será realizado nas condições previstas por norma (ASTM D790).

Foi utilizada a análise de variância (ANOVA), através do teste *F*, para verificar se existiam diferenças significativas entre as médias dos resultados obtidos para a resistência máxima e módulo de elasticidade em flexão, variando-se a fração volumétrica de fibras em cada amostra. O nível de confiança utilizado para todos os testes foi de 95%. Após a verificação da existência de diferença significativa entre as médias dos resultados obtidos (validade da hipótese alternativa H1), para os diversos tipos e frações volumétricas de fibras ou tecido de malva, foi utilizado o Teste de Tukey, também conhecido como teste da diferença honestamente significativa (*HSD*). O objetivo foi avaliar quantitativamente dois a dois cada um dos tipos ou percentuais de fibras ou tecido utilizados (tratamentos). Trata-se de um teste de hipóteses, no qual, a partir dos resultados obtidos rejeita-se ou não a hipótese de igualdade com base na diferença mínima significativa (*d.m.s.*), dada pela Equação 1:

$$d. m. s. = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad (1)$$

onde q é amplitude total estudantizada, a qual é função do grau de liberdade (G.L.) do resíduo e do número de tratamentos; QMR é o quadrado médio do resíduo; e r é o número de repetições de cada tratamento [4].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais utilizados

Foram utilizadas fibras de malva fornecidas pela Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) e adquiridas da Companhia Têxtil de Castanhal. A Figura 1 mostra as fibras de malva como fornecidas.



Figura 1. Fibras de malva como fornecidas pela UENF.

O polímero utilizado como o material da matriz da placa compósita foi a resina epóxi comercial do tipo éter diglicidílico do bisfenol A (DGEBA), endurecida com trietileno tetramina (TETA), utilizando-se a proporção estequiométrica de 13 partes de endurecedor para 100 partes de resina. A empresa fabricante da resina foi a Dow Chemical do Brasil e fornecida pela distribuidora RESINPOXY Ltda.

2.2 Preparação das fibras de malva

Primeiramente as fibras foram limpas, cortadas na dimensão de 150mm e secas em estufa por 24h. Com isso foram fabricadas as placas compósitas.

2.3 Preparação dos compósitos epóxi-fibras de malva

Para fabricar os compósitos foi utilizada matriz metálica (Figura 2) com volume interno de $214,2 \text{ cm}^3$ (dimensões $15 \times 12 \times 1,19 \text{ cm}$). As placas foram prensadas em uma prensa hidráulica de 30 toneladas. Utilizou-se uma carga de 5 toneladas durante 24 horas para fabricação dos corpos compósitos [5,6,7]. Para as fibras de malva utilizou-se como referência inicial a densidade de $1,40 \text{ g/cm}^3$ [8,9] e para a resina epóxi (DGEBA-TETA) o valor de $1,11 \text{ g/cm}^3$ [10]. Os percentuais de malva utilizados no trabalho variaram de 0% a 30%v/v.



Figura 2. Matriz metálica para confecção de placas compósitas.

2.4 Preparação dos corpos para ensaio de flexão

Os corpos para ensaio de flexão foram produzidos a partir do corte das placas compósitas em serra de fita, nas dimensões previstas na ASTM D790. Objetivou-se medir a resistência à flexão (MPa) e o módulo de elasticidade (GPa). Foram produzidas 7 amostras para cada percentual de fibras ensaiado, nas dimensões 120 x 15 x 6 mm. Na Figura 3 são mostradas as amostras preparadas para o ensaio.

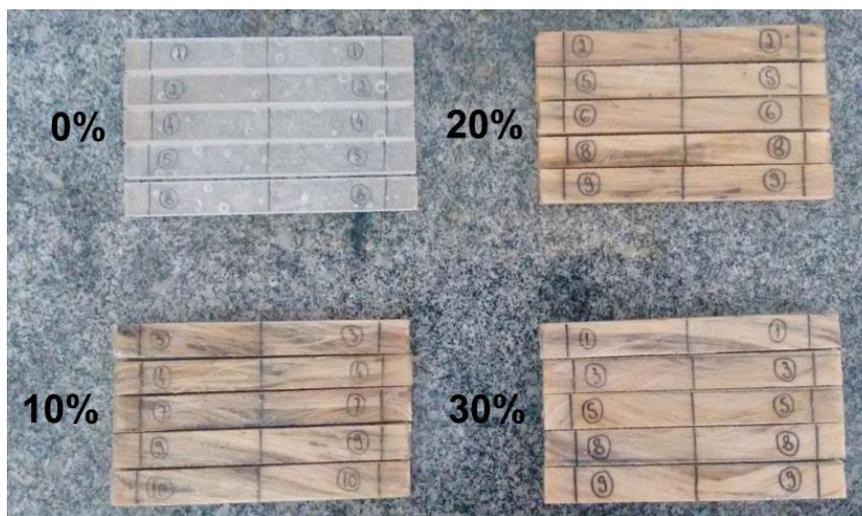


Figura 3. Corpos de prova com fibras de malva para ensaio de flexão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos para o ensaio de flexão em 3 pontos nos compósitos reforçados com fibras de malva contínuas e alinhadas. Da mesma forma que outros autores que também trabalharam com CFNLs constatou-se que a resistência mecânica e o módulo de elasticidade em flexão cresceram com o percentual de fibras [11-13]. Os testes foram realizados nos percentuais de 0%, 10%, 20% e 30%v/v de fibras. Nas Figuras 4 e 5 são mostrados o crescimento da resistência mecânica e do módulo de elasticidade com o aumento do percentual de fibras incorporado nos compósitos.

Tabela 1. Resultados para o ensaio de flexão em 3 pontos de compósitos reforçados com fibras de malva nos percentuais de 0%, 10%, 20% e 30%v/v.

Percentual de fibras de malva	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
0%	36,6 ± 16,00	3,12 ± 0,28
10%	80,47 ± 5,89	6,20 ± 0,49
20%	138,84 ± 23,61	8,58 ± 1,53
30%	191,27 ± 22,68	10,9 ± 0,58

Resistência à flexão

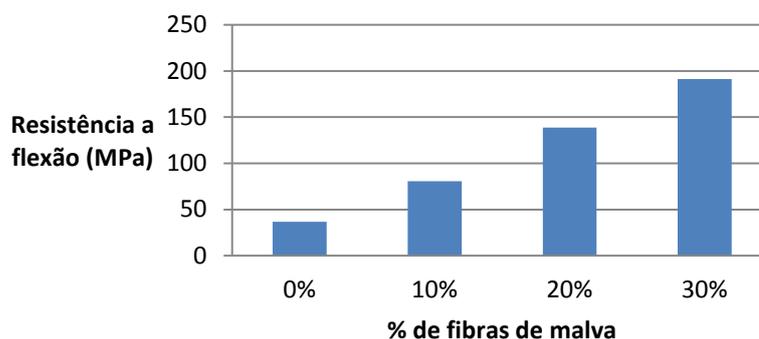


Figura 4. Variação da resistência à flexão com percentuais de fibras de malva atuando como reforço em compósitos de matriz epoxídica.

Módulo de elasticidade

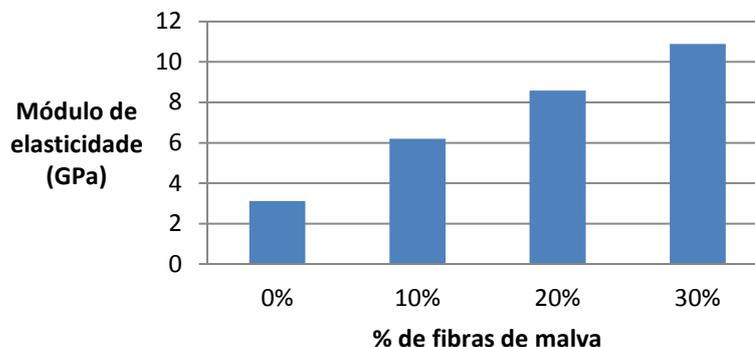


Figura 5. Variação do módulo de elasticidade com percentuais de fibras de malva atuando como reforço em compósitos de matriz epoxídica.

Na Figura 6 são mostrados os corpos de prova após a realização do ensaio de flexão em 3 pontos. Uma análise visual das superfícies de fratura revelou a atuação de mecanismos tipicamente frágeis atuando até um percentual de reforço de 10%. A partir deste percentual percebeu-se que as fibras funcionaram como reforço efetivo do compósito (20% e 30%v/v), em razão da atuação de mecanismos como a fratura de fibras e o descolamento das fibras na interface fibra-matriz.



Figura 6. Corpos de prova de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de malva nos percentuais de 0%, 10%, 20% e 30%v/v, após ensaio de flexão em 3 pontos.

As imagens em microscopia eletrônica de varredura na Figura 7 demonstram de uma maneira mais clara a atuação dos mecanismos de fratura envolvidos no processo.

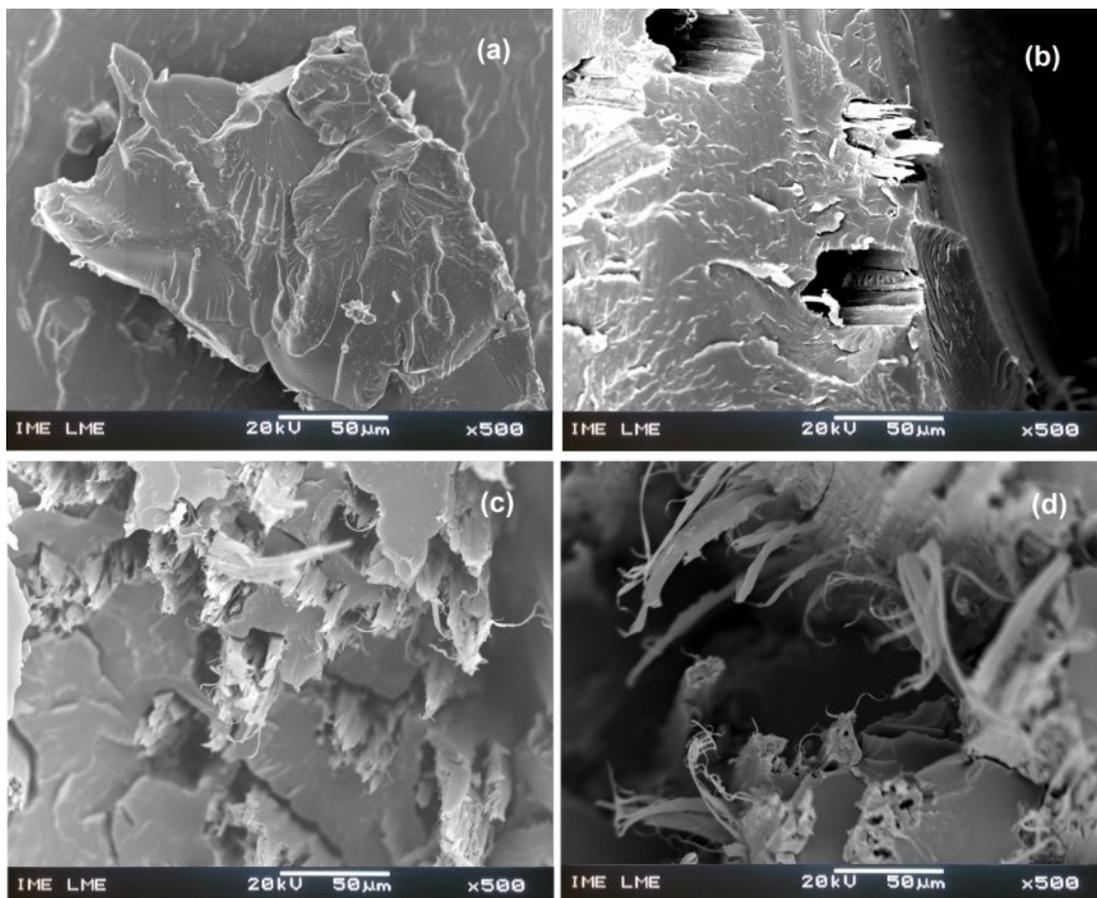


Figura 7. Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura dos compósitos reforçados com fibras de malva, após ensaio de flexão (500x). (a) 0%; (b) 10%; (c) 20% e (d) 30%v/v de fibras.

Na Figura 7(a) percebe-se a atuação do mecanismo de fratura completamente frágil, caracterizado pela presença de padrões tipo “marcas de rio” e “marcas de praia”. Na Figura 7(b) o reforço de fibras ainda não mostrou-se efetivo, o que tornou o mecanismo de fratura frágil ainda dominante no compósito [3;11;13].

Para os compósitos com fração de 20%v/v de fibras presentes na Figura 7(c) percebeu-se uma atuação maior das fibras no mecanismo de fratura, evidenciado por fibras rompidas e descoladas da matriz (efeito “pull-out”). Este fato foi comprovado pelo aumento da resistência à flexão em torno de 60% e do módulo de elasticidade em torno de 70% (Tabela 1), conforme já apresentado.

Na imagem da Figura 7(d) percebeu-se com maior intensidade a ruptura de fibras, bem como o efeito “pull-out”. Houve um reforço mais efetivo das fibras na matriz, o que foi comprovado pela maior atuação de mecanismos de falha associados a fratura dúctil, bem como pelo aumento nas propriedades de resistência à flexão e módulo de elasticidade comparativamente a outras frações volumétricas testadas. Os resultados obtidos estão coerentes com os resultados obtidos por outros autores que também realizaram ensaio de flexão em CFNLs [3;11;13].

Foi também realizada análise de variância (ANOVA) para verificação se havia diferença significativa entre os resultados obtidos para a resistência à flexão e módulo de elasticidade entre os compósitos epoxídicos reforçados com 0%, 10%, 20% e 30%v/v com fibras de malva. As Tabelas 2 e 3 mostram os resultados obtidos.

Tabela 2. Análise de variância da resistência à flexão para os compósitos epoxídicos reforçados com 0%, 10%, 20% e 30%v/v com fibras de malva.

Causas de variação	GL	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado	F crítico (tabelado)
Tratamentos	3	92672,28	30890,76	77,73	3,01
Resíduo	24	9537,74	397,41		
Total	27	102210,02			

Tabela 3. Análise de variância do módulo de elasticidade para os compósitos epoxídicos reforçados com 0%, 10%, 20% e 30%v/v com fibras de malva.

Causas de variação	GL	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado	F crítico (tabelado)
Tratamentos	3	233,05	77,68	88,82	3,01
Resíduo	24	20,99	0,87		
Total	27	254,04			

A partir dos resultados obtidos pela análise de variância das Tabelas 2 e 3 rejeitou-se a hipótese de que as médias fossem iguais com nível de significância de 5%, pois pela estatística “F”, têm-se: F calculado (77,73) >> F crítico ou tabelado (3,01) para a resistência à flexão e F calculado (88,82) >> F crítico ou tabelado (3,01) para o módulo de elasticidade. Portanto, a fração volumétrica de fibras de malva nos compósitos de matriz epóxi mostrou ter efeitos diferentes na resistência à flexão e no módulo de elasticidade. Por isso, aplicou-se o Teste de Tukey para comparação de médias utilizando-se um nível de confiança de 95% para verificar qual fração volumétrica de fibras de malva proporcionou melhores resultados em termos de propriedades mecânicas em flexão. A diferença média significativa (d.m.s) encontrada foi de 31,42 e 1,47, respectivamente para a resistência à flexão e módulo de elasticidade. As Tabelas 4 e 5 mostram os resultados obtidos para as diferenças entre os valores médios das propriedades estudadas em cada fração volumétrica de fibras de malva.

Tabela 4. Resultados obtidos para as diferenças entre os valores médios de resistência à flexão nas frações volumétricas de fibras de malva de 0 a 30%v/v, após aplicação do teste de Tukey.

Fração volumétrica de fibras de malva	0%	10%	20%	30%
0%	0	40,86	99,24	151,67
10%	40,86	0	58,37	110,80
20%	99,24	58,37	0	52,43
30%	151,67	110,80	52,43	0

Tabela 5. Resultados obtidos para as diferenças entre os valores médios de módulo de elasticidade nas frações volumétricas de fibras de malva de 0 a 30%v/v, após aplicação do teste de Tukey.

Fração volumétrica de fibras de malva	0%	10%	20%	30%
0%	0	3,08	5,47	7,78
10%	3,08	0	2,39	4,70
20%	5,47	2,39	0	2,31
30%	7,78	4,70	2,31	0

Com base nesses resultados, tem-se que, com nível de significância de 5%, que o compósito reforçado com 30%v/v de fibras de malva apresentou melhor desempenho, pois exibiu maior valor de resistência à flexão (191,27 MPa) e módulo de elasticidade (10,9 GPa), e estes são significativamente diferentes dos demais, pois as diferenças encontradas foram superiores ao d.m.s (31,42 e 1,47 respectivamente). Este fato também foi comprovado por outros trabalhos envolvendo medidas de propriedades em flexão em CFNLs [11-13].

3 CONCLUSÃO

A resistência e o módulo de elasticidade em flexão crescem à medida que se aumenta a fração volumétrica de fibras de malva incorporadas a matriz. Dentre os materiais testados, através da Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey, com nível de confiança de 95%, os compósitos com 30%v/v de fibras de malva foram os que exibiram os melhores resultados. Houve predominância de fratura frágil nos compósitos com frações volumétricas de fibras de malva de 0%, 10% e dúctil para os compósitos com 20% e 30%. Para esses últimos houve atuação mais efetiva do reforço, com a predominância de mecanismos como ruptura de fibras e descolamento interfacial com a matriz epóxi, o que gerou valores de $191,27 \pm 22,68$ MPa e $10,9 \pm 0,58$ GPa, respectivamente para a resistência máxima e módulo de elasticidade em flexão.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao CNPq, à FAPERJ e à CAPES por meio do PDS pelo financiamento da pesquisa, através do programa 31007015006P4, e a UENF pelo fornecimento das fibras de malva.

REFERÊNCIAS

- 1 MOHANTY, A.K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. Biofibres, Biodegradable Polymers and Bio-composites: An Overview. *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 276/277, 1–24, 2000.
- 2 CALLISTER, W.D. RETHWISCH, D. G.; ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 9. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- 3 MARGEM, J.I. Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de malva. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2013.
- 4 VIEIRA, S. Análise de Variância (ANOVA). São Paulo, SP: Editora Atlas; 2006.
- 5 LUZ, F.S. Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamada dom Compósito de Epóxi Reforçado com Fibra de Juta. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2014.
- 6 MILANEZI, T.L. Avaliação do Comportamento Balístico Sinérgico de Blindagem Multicamadas com a Fibra de Rami. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015.
- 7 BRAGA, F.O. Comportamento Balístico de uma Blindagem Multicamada utilizando Compósito Poliéster-Curauá como Camada Intermediária. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015.
- 8 AGOPYAN, V.; SAVASTANO Jr., H. Uso de materiais alternativos à base de fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira. In: Seminário Iberoamericano, 1997.
- 9 OLIVEIRA, J.T.S. Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil. 1998. 429f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- 10 SILVA, L.C. Comportamento balístico do composito epoxi-curaua em blindagem multicamada. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.
- 11 GOMES, M.A. Propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de folhas de abacaxizeiro (PALF)/Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2015.
- 12 BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites Reinforced with Cellulose Based Fibres. *Progress in Polymer Science*, Vol. 4, 221-274, 1999.
- 13 CANDIDO, V.S. Caracterização e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.]