

DESEMPENHO DE COMPÓSITOS EPOXÍDICOS REFORÇADOS COM TECIDO DE FIQUE SOB IMPACTO DE MUNIÇÃO 7,62 MM COMO BLINDAGEM MONOLÍTICA*

Michelle Souza Oliveira¹
Fabio Da Costa Garcia Filho²
Luana Cristyne Da Cruz Demosthenes³
Fábio Oliveira Braga⁴
Artur Camposo Pereira⁵
Édio Pereira Lima Jr⁶
Sergio Neves Monteiro⁷

Resumo

O desenvolvimento de materiais compósitos de matriz polimérica (CMPs) reforçados com fibras naturais se alia à ideia sustentabilidade e potencializa a produção de materiais ambientalmente corretos. Em aplicações estruturais, quando é fundamental para o projeto uma elevada relação resistência peso, os CMPs vêm substituindo com sucesso diversos materiais convencionais. Atualmente, tecidos de fibras sintéticas possuem preferência para a camada intermediária em sistemas de blindagem multicamadas (SBM). Todavia, compósitos reforçados com fibras de fique têm sido estudados como segunda camada nos SBM motivado pela sua baixa densidade e baixo custo. No presente trabalho foi estudado o comportamento balístico de compósitos epoxídicos fabricados com tecido de fique submetidos ao impacto com munição 7,62 mm. De tal modo que compósitos com 15, 30, 40 e 50% vol. de tecido foram produzidos e testados como sistema independente para avaliar a energia absorvida pela blindagem, comparando os resultados com amostras de laminados de KevlarTM, utilizando a distribuição de Weibull para análise estatística. Entre os materiais testados, os compósitos com 50% de tecido foram considerados a melhor alternativa de substituição ao KevlarTM.

Palavras-chave: Tecido de fique; Blindagem balística; Fibras naturais; Compósitos.

PERFORMANCE OF FIQUE FABRIC REINFORCED EPOXY COMPOSITES UNDER 7,62 MM BULLET IMPACT AS A STAND-ALONE BALLISTIC ARMOR

Abstract

The development of polymer matrix composite materials (PMCs) reinforced with natural fibers joins the idea of sustainability and enhances the production of environmentally correct materials. In structural applications, when a high strength-to-weight ratio is critical to the design, PMCs have been successfully replacing many conventional materials. Currently, synthetic fiber fabrics have preference for the intermediate layer in multilayered armor system (MAS). However, composites reinforced with fique fibers have been studied as second layer in MAS due to their low density and low cost. In the present work the ballistic behavior of epoxy composites fabricated with fique fabric subjected to impact with 7.62 mm ammunition was studied. In such a way that composites with 15, 30, 40 and 50% vol. of fabric were produced and tested as stand-alone system to evaluate the energy absorbed by the armor, comparing the results with samples of KevlarTM laminates using the Weibull distribution for statistical analysis. Among the materials tested, composites with 50% of fabric were found to be the best substitution alternative to KevlarTM.

Keywords: Fique fabric; Ballistic armor; Natural fiber; Composites.

- ¹ *Engenheira Civil, Mestrando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ² *Engenheiro de Materiais, Mestrando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ³ *Engenheira Civil, Mestrando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ⁴ *Engenheiro Metalúrgico, D.Sc em Ciência dos Materiais, SENAI, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ⁵ *Engenheiro Metalúrgico, Mestre em Ciência dos Materiais, Doutorando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ⁶ *Engenheiro Mecânico, D.Sc em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ⁷ *Engenheiro Metalúrgico, Ph.D em Materials Science and Engineering, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico relacionado com as exigências de consumo continua a aumentar a demanda sobre os recursos globais, levando a importantes questões de disponibilidade de materiais e sustentabilidade ambiental. Neste cenário, diversos setores têm buscado alternativas no sentido de reduzir os impactos ambientais decorrentes dos processos produtivos, bem como da utilização dos produtos fabricados e seu descarte [1]. Isso inclui a tecnologia de armas e munições onde está sendo dada atenção ao desenvolvimento de novos materiais que suportem ao impacto balístico. A tendência atual nos projetos de blindagens está direcionada para uma melhor relação proteção/peso [2,3].

Muitos dos materiais utilizados no passado para proteção balística foram feitos de metais e, portanto, muito pesados. Avanços na indústria têxtil tornaram possível produzir blindagens com desempenho equivalente ou melhor aos seus antecessores metálicos. O uso de materiais têxteis tem vários benefícios, como menor peso, mais conforto, flexibilidade ao movimento corporal e facilidade de fabricação para diferentes tamanhos [4]. O colete balístico é projetado com base no tipo de ameaça a ser resistido, assim, podem usar deste uma blindagem de camada única com apenas um material resistente a munição como o de um compósito com camadas de tecido de aramida, comercialmente conhecido como Kevlar™ [2,5], limitadas a uma munição de 9 mm com velocidade de impacto relativamente baixa, ou um sistema de blindagem multicamadas (SBM) com munição de calibre 7,62 mm com velocidade de impacto elevada.

Como um componente mais leve desse SBM, a camada intermediária de compósito não se destina apenas a proporcionar mobilidade ao usuário, como também a melhorar a eficiência de absorção do impacto do projétil [6]. Assim, a substituição do tecido de aramida por um compósito reforçados com fibras naturais de menor densidade seria uma alternativa para favorecer a absorção de impacto. Para o conhecimento dos autores do presente trabalho, Wambua et al [7] foram provavelmente o primeiro grupo a realizar uma investigação sistemática sobre as propriedades balísticas dos compósitos reforçados com fibras lignocelulósicas. **Publicações recentes [13-17] revelaram que as fibras naturais, assim como os compósitos de polímeros reforçados com tecidos, exibem desempenho balístico comparável ao Kevlar™.**

O crescente interesse por aplicações de engenharia está continuamente exigindo trabalhos de pesquisa sobre fibras e tecidos naturais promissores menos comuns. Um exemplo é a fibra de fique que chamou a atenção por seu potencial como um reforço em compósitos [13-17]. Uma forma de avaliar a eficácia de um sistema de blindagem balística é baseada em medidas de velocidade em que um projétil específico atinge a blindagem. Neste trabalho, avaliou-se os materiais por meio da medida da energia absorvida do projétil [8,9], permitindo análise individual de materiais diferentes. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho individual de compósitos de matriz epóxi reforçados com 15, 30, 40 e 50% vol. de tecido de fique, os resultados foram então comparados com amostras de laminados de Kevlar™ [8,10], quando submetidos ao impacto balístico com munição 7,62 mm.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de produzir e ensaiar placas compósitas para aplicações sob impacto balístico, utilizamos materiais como: um sistema de resina epóxi (matriz polimérica) e fibra de fique em forma de tecido (reforço).



Figura 1. Plantação de fique (*Furcraea andina*) na Colômbia (a) e pedaço do tecido de fique (b).

2.1 Sistema Epóxi

Dentre as matrizes termorrígidas disponíveis comercialmente, as resinas epóxis constituem o grupo mais usado como adesivos e matrizes em compósitos de alto desempenho [11]. Especificamente, para sistemas formados pelo monômero epoxidico do tipo éter diglicídico do bisfenol A (DGEBA) com endurecedor do tipo trietileno tetramina (TETA), um excesso deste último em relação à percentagem estequiométrica (13 phr), produz polímeros com elevada tenacidade [12].

O sistema epóxi utilizado neste estudo é formado pela resina epóxi MC 130 e pelo endurecedor FD 129 produzido pela Dow Chemical S. A. e fornecido pela Epoxyfiber. A resina MC 130 é uma resina bifuncional, líquida à temperatura ambiente e com estrutura básica de diglicidil éter do bisfenol A (DGEBA). O endurecedor FD 129 é um líquido composto basicamente pela amina alifática hexafuncional trietileno tetramina (TETA). As propriedades da resina MC 130 e do FD 129 estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1. Especificações da resina e endurecedor utilizados

Resina MC 130	
Denominação química	DGEBA
Estado físico	Líquido
Viscosidade a 25°C	12000-16000 mPas
Peso específico a 25°C	1,15 g/cm ³
Endurecedor FD 129	
Denominação química	TETA
Estado físico	Líquido
Viscosidade a 25°C	20-30 cPs
Peso específico a 25°C	0,975-0,98 g/cm ³
%TETA	Acima de 96

Este sistema é de cura à frio e de reação exotérmica, sendo normalmente empregado em compósitos reforçados por fibras [11].

2.2 Tecido de fibra de fique

O tecido de fibra de fique foi obtido no comércio local na Colômbia. A densidade planar média do tecido (Figura 1b) investigado neste estudo foi 0,086 g/cm². A densidade média da fibra de 0,667 g/cm³ e diâmetro médio de 0,18 mm, foram apresentados em outros lugares [13]. Os tecidos foram cortados nas dimensões de 150 x 120 mm² e, antes de serem usados, foram secos em estufa a 60°C durante 24h. As placas retangulares de compósitos com dimensões laterais de 150 mm x 120 mm e espessura de 10 mm foram fabricadas com 15, 30, 40 e 50% volume de tecido em matriz epóxi, as frações estão associadas às camadas de tecido, sendo elas 1, 2, 3 e 4 camadas, respectivamente.

Os pedaços de tecidos foram colocados manualmente em um molde de aço. Inicialmente, a mistura DGEBA/TETA foi vertido para produzir compósitos à temperatura ambiente sob uma pressão de 5 MPa durante 24 horas.

Tabela 2. Tipo e designação dos materiais ensaiados neste trabalho

Tipo	Designação	Referência
Epóxi reforçado com 15%vol. de tecido de fique	E-15%TF	PT
Epóxi reforçado com 30%vol. de tecido de fique	E-30%TF	PT
Epóxi reforçado com 40%vol. de tecido de fique	E-40%TF	PT
Epóxi reforçado com 50%vol. de tecido de fique	E-50%TF	PT
Aramida	Aramida	[2]

PT – Presente Trabalho

2.3 Ensaio Balísticos

Os ensaios balísticos foram realizados no Centro de Avaliações do Exército (CAEx). Para a realização desses foram considerados os fatores dispostos na Tabela 3. Foi utilizada uma munição 7,62 mm M1 da classe III FMJ, considerando uma trajetória perpendicular (90°). O alvo foi posicionado a 15 metros do provete balístico e a velocidade do projétil em dois momentos, sendo o primeiro imediatamente antes de impactar o alvo (v_i) e o segundo após a perfuração do alvo (v_r), foi medida por uma barreira óptica e um radar Doppler.

Tabela 3. Munição utilizada para o ensaio

Nível de proteção	Calibre	Massa (g)	Velocidade mínima do projétil (m/s)
III	7,62 x 51	9,7	823

A variação de energia cinética do projétil foi relacionada à energia absorvida pela blindagem (E_{abs}) e foi avaliada pela Equação 1.

$$E_{abs} = m \left(\frac{v_i^2 - v_r^2}{2} \right) \quad (1)$$

Onde: v_i = velocidade de impacto do projétil; v_r = velocidade residual do projétil após o impacto; m = massa do projétil. Se o SBM absorver totalmente a energia cinética do projétil, o limite balístico pode ser estimado pela Equação 2.

$$V_L = \sqrt{\frac{2E_{abs}}{m}} \quad (2)$$

Os valores foram então tratados estatisticamente usando a estatística de Weibull por meio da função de distribuição cumulativa:

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\theta} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

Onde: x = energia absorvida; β = módulo de Weibull; θ = energia absorvida característica.

Aplicando o logaritmo duplo, uma expressão linear permite a interpretação gráfica dos parâmetros Weibull:

$$\ln \ln \left[\frac{1}{1-F(x)} \right] = \beta \ln x - (\beta \ln \theta) \quad (4)$$

3 RESULTADOS

Os ensaios de velocidade residual realizados tiveram a finalidade de estimar a energia absorvida pelos materiais, utilizando as Equação 1 e Equação 2. Neste ensaio todos os alvos foram perforados. A Tabela 4 mostra os valores de velocidade média de impacto do projétil (\bar{V}_i), a velocidade residual média (\bar{V}_r), a energia absorvida (E_{abs}), sua porcentagem em relação à energia total ($\%E_{abs}$), bem como a estimativa da velocidade limite (V_L) para cada material considerado. Para fins comparativos, nessa avaliação também utilizou os resultados da aramida obtido por outros autores [2]. E levou-se em consideração que a velocidade média de impacto de 846m/s corresponde a uma energia cinética do projétil de 3,47 kJ [18].

Tabela 4. Valores das velocidades médias de impacto e residual, energia absorvida e velocidade limite para cada componente do SBM

	Material			
	E-15%TF	E-30%TF	E-40%TF	E-50%TF
Energia absorvida (J)	155	159	136	150
	190	173	155	185
	196	194	162	196
	205	199	186	199
	214	203	218	221
	224	210	254	246
	233	327	290	333
Energia média (J)	203±26	209±55	200±56	219±59
% Energia absorvia	5,84	6,03	5,77	6,30
Velocidade de impacto (m/s)	839±7	840±8	837±4	843±4
Velocidade residual (m/s)	814±6	813±8	812±10	816±5
Velocidade limite (m/s)	204±13	206±25	202±28	211±27

A análise de Weibull foi aplicada nos resultados do teste de velocidade residual. Para essa situação a unidade característica resultante da estatística de Weibull representa a energia absorvida (E_{abs}). A Tabela 5 resume os valores médios e desvios padrão de energia limite, juntamente com o módulo de Weibull correspondente (β), a função característica (θ) e o parâmetro de precisão (R^2).

Tabela 5. Parâmetros de Weibull, média e desvio padrão da energia absorvida (E_{abs}) para os diferentes materiais

Material	Energia absorvida (J)	Desvio padrão	β	θ	R^2
E-15%TF	203	26	7,85	214,56	0,96
E-30%TF	209	55	4,01	231,81	0,72
E-40%TF	200	56	3,77	221,71	0,93
E-50%TF	219	59	4,05	241,26	0,88
Aramida	57 (1,7%)	8	-	-	-

Com exceção do E-30%TF que apresentou um ajuste razoável de R^2 , igual a 0,72, os outros componentes testados (E-30%TF, E-40%TF e E-50%TF) exibiram bons ajustes. Esse resultado indica que os dados obtidos para o compósito E-30%TF são menos homogêneos se comparado com os demais. Ainda, nota-se que o E-50%TF apresentou maior velocidade limite (Tabela 4), o que indica maior absorção de energia, até mesmo quando comparado a aramida (Tabela 5).

Este fenômeno pode ser explicado pela fragmentação frágil da matriz em conjunto com os mecanismos atuantes na fibra e a presença de vazios[5]. Já para a aramida a relativamente baixa velocidade limite (108 m/s) que conduz a baixa absorção de energia (57 J), pode estar associada ao tipo de munção. Uma munção de 7,62 x 51 mm de alta energia provavelmente penetra facilmente entre o tecido de aramida simplesmente separando ou arrancando os fios [5,18]. Em outras palavras, o tecido de aramida não é barreira tão efetiva para um projétil 7,62 em comparação aos compósitos produzidos com tecido de fique.

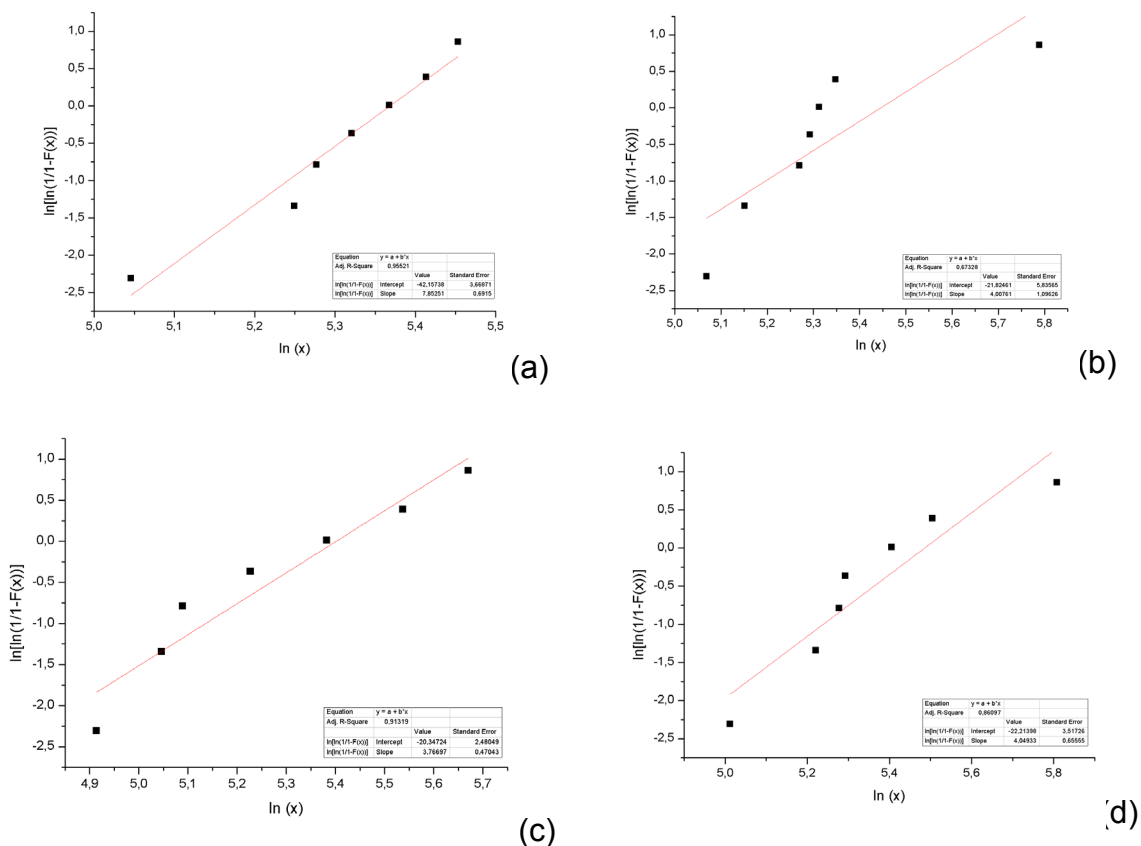


Figura 2. Gráficos de Weibull para os compósitos (a) E-15%TF, (b) E-30%TF, (c) E-40%TF e (d) E-50%TF.

A Figura 2 apresenta os quatro gráficos de Weibull, conforme a Equação (4), relacionados pelas energias absorvidas em alvos de compósito E-15%TF (Fig. 9a), assim como E-30%TF (Fig. 9b), E-40%TF (Fig. 9c) e E-50%TF (Fig. 9d). Uma correlação linear para os pontos de dados também é mostrada nessas figuras, refletindo sua característica unimodal.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 3.Corpos de prova submetidos ao impacto balístico: (a) E-15%TF; (b) E-30%TF; (c) E-40%TF; (d) E-50%TF.

O fato de manter a integridade após o impacto balístico é de fundamental importância para compor o SBM para munição 7,62mm, principalmente na segunda camada que possui a finalidade de absorver fragmentos de um material cerâmico frontal [5]. Os SBM E-40%TF e E-50%TF apresentaram um comportamento mais adequado. Outro fator importante é que a proteção balística local é perdida após a fragmentação da primeira camada do SBM, e por este motivo é importante que a blindagem seja leve, mantendo a mobilidade do combatente ou veículo.

3 CONCLUSÃO

No desempenho individual de cada material utilizado como camada intermediária, o compósito E-50%TF apresentou maior velocidade limite, de 211 m/s, o que indica uma maior absorção de energia.

De todas as composições testadas, considera-se o compósito E-50%TF o de melhor desempenho balístico, quando utilizado como camada intermediária em blindagens multicamada. Assim, considera-se que este material tem propriedades aceitáveis para compor um SBM com a vantagem de ser ambientalmente correto, leve, possuir baixo custo, e ampla disponibilidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio das agências brasileiras: CNPq, FAPERJ e CAPES para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Rodrigues J. Compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais da Amazônia fabricados por infusão. *Revista Matéria*. 2016; 20 (4): 946-960.
- 2 Braga FO, Bolzan LT, Lima Jr EP, Monteiro SN. Performance of natural curauá fiber-reinforced polyester composites under 7,62 mm bullet impact as a stand-alone ballistic armor. *Journal of Materials Research and Technology*. 2017; 6(4):323-328.
- 3 Alves ALS, Nascimento LFC, Suarez JCM. Comportamento balístico de compósito de polietileno de altíssimo peso molecular: efeito da radiação gama. *Polímeros*. 2004; 14(2):105-111.
- 4 Wang L, Kanesalingam S, Nayak R, Padhye R. Recent trends in ballistic protection. *Textiles and Light Industrial Science and Technology*. 2014; 3:37-47.
- 5 Luz FS, Lima Jr EP, Louro LHL, Monteiro SN. Ballistic test of multilayered armor with intermediate epoxy composite reinforced with jute fabric. *Materials Research*. 2015; 18(Suppl.2):170-177.
- 6 Cruz RB, Lima Jr EP, Monteiro SN, Louro LHL. Giant bamboo fiber reinforced epoxy composite in multilayered ballistic armor. *Materials Research*. 2015; 18(Suppl.2):70-75.
- 7 Wambua P, Vangrimde B, Lomov S, Verpoest I. The response of natural fibre composites to ballistic impact by fragmenting projectiles. *Composite Structures*. 2007; 77: 232-240.
- 8 Monteiro SN, Lima JR EP, Louro LHL, Silva LC, Drelich JW. Unlocking function of aramid fibers in multilayered ballistic armor. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2014; 46(1):37-40.
- 9 Monteiro SN, Louro LHL, Trindade W, Elias CN, Ferreira CL, Lima ES, Weber RP, Suarez JCM, Figueiredo ABS, Pinheiro WA, Silva LC, Lima Jr. EP. Natural Curauá Fiber-Reinforced Composites in Multilayered Ballistic Armor. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2015;46(10):4567-4577.
- 10 Nascimento LFC, Holanda LIF, Louro LHL, Monteiro SN, Gomes AV, Lima Jr EP. Natural mallow fiber-reinforced epoxy composite for ballistic armor against class III-A ammunition. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017; 48(10):4425-4431
- 11 Almeida JRM, Monteiro SN. Efeito da variação da razão resina/endurecedor sobre a resistência ao impacto de uma resina epóxi. *Polímeros*. 1996; 6(1):44-49.
- 12 Monteiro SN, Menezes GW, Skury ALD, Lopes FPD, Rodriguez RJS, Bobrovnichii GS. Propriedades mecânicas e termomecânicas de compósitos com partículas de diamante dispersas em matriz epoxídica modificada na razão resina/endurecedor. *Revista Matéria*. 2006; 11(4):385-394.
- 13 Netto PA, Altoe GR, Margem FM, Braga FO, Monteiro SN, Margem IM. Correlation between the density and the diameter of fique fibers. *Materials Science Forum*. 2016; 869:377-383.

- 14 Altoe GR, Netto PA, Barcelos M, Gomes A, Margem FM, Monteiro SN. Bending mechanical behavior of polyester matrix reinforced with fique fiber. Characterization of Minerals, Metals and Materials; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2015; 117–121.
- 15 Altoe GR, Netto PA, Teles MCA, Daniel G, Margem FM, Monteiro SN. Tensile strength of polyester composites reinforced with fique fibers. Characterization of Minerals, Metals and Materials; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2015; 465–470.
- 16 Altoe GR, Netto PA, Teles MCA, Borges LGX, Margem FM, Monteiro SN. Tensile strength of epoxy composites reinforced with fique fibers. Characterization of Minerals, Metals and Materials; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2016; 391–396.
- 17 Pereira AC, Monteiro SN, Assis FS, Ferreira CL, Simonassi NT, Weber RP, Oliveira MS, Colorado HA. Fique fabric: a promising reinforcement for polymer composites. Polymers. 2018;10(3):246-256.
- 18 Rohen LA, Margem FM, Monteiro SN, Vieira CM, Araujo BM, Lima ES. Ballistic efficiency of an individual epoxy composite reinforced with sisal fibers in multilayered armor. Materials Research. 2015; 18(Suppl.2):55-62.