

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE BLINDAGEM MULTICAMADA COM  
COMPÓSITO DE EPÓXI REFORÇADO COM TECIDO DE FIQUE

Autora: Michelle Souza Oliveira

Nível: Mestrado em Ciência dos Materiais

Orientadores: Prof. Lucio Fabio Cassiano Nascimento – D. Sc.

Prof. Sergio Neves Monteiro – Ph. D.

Avaliadores: Carlos Nelson Elias, Lucio Fabio Cassiano Nascimento, Luiz  
Paulo Mendonça Brandão

Rio de Janeiro

2019

# COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE BLINDAGEM MULTICAMADA COM COMPÓSITO DE EPÓXI REFORÇADO COM TECIDO DE FIQUE

Michelle Souza Oliveira<sup>1</sup>, Sergio Neves Monteiro<sup>1</sup>, Lucio Fabio Cassiano Nascimento<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia - IME, Departamento de Ciência dos Materiais, Praça General Tibúrcio, 80, CEP 22290-270, Urca, Rio de Janeiro, Brasil.  
oliveirasmichelle@gmail.com

## Resumo

Este artigo tem a intenção de divulgar o trabalho desenvolvido no Instituto Militar de Engenharia, na área de Ciência dos Materiais, relacionado ao comportamento balístico de Compósitos Poliméricos com Fibras Naturais. A frente de pesquisa tem a finalidade de desenvolver materiais compósitos com tecnologia de fabricação relativamente mais barata e simples, e que possuam desempenho similar a dos materiais aplicados na indústria de blindagem balística encontrados no mercado, como por exemplo as fibras sintéticas aramida (Kevlar®), e o polietileno de ultra alto peso molecular (Dyneema®). Deste modo esperamos despertar o interesse da comunidade científica e tecnológica das mais diversas áreas em colaborar com o desenvolvimento de novas tecnologias que possam substituir parcialmente e eficientemente os materiais sintéticos, bem como visando o desenvolvimento econômico e tecnológico de regiões produtoras de fibras naturais.

**Palavras-chave:** fibra de fique, compósito de fibra natural, comportamento balístico.

## INTRODUÇÃO

Muitos conflitos recentes envolvem espaço geopolítico valioso, aumento de rivalidades de poder regional e global, maior envolvimento externo em conflitos e a fragmentação e proliferação de grupos armados. As necessidades cada vez maiores de segurança e proteção estão impulsionando a demanda por soluções de blindagem capazes de combater as ameaças presentes e futuras. Entre as maiores demandas observadas está a proteção dos combatentes, resultando na necessidade do aumento da capacidade de proteção balística, aliado à otimização da mobilidade das tropas. Deste modo, a proteção ideal precisa ser alcançada sem comprometer as restrições práticas, como redução de peso e custo. Os materiais usados na blindagem pessoal dependem da ameaça a ser derrotada e da parte do corpo a ser protegida. Para o tronco, são comumente utilizadas múltiplas camadas de tecidos, unidirecionais ou feltrados, produzidos a partir de fibras de alta resistência à tração. As fibras mais comuns são nylon balístico, para-aramidas (Kevlar® ou Twaron®), polietilenos de ultra-alto peso molecular (Dyneema® e Spectra®) e polifenileno-2,6-benzobisoxazol (Zylon®). Os materiais também podem ser encapsulados dentro de uma matriz de resina e prensados em uma estrutura composta rígida (COOPER & GOTTS, 2011).

A possibilidade de substituir os materiais tradicionais de uso intensivo de energia por materiais naturais está ganhando atenção (MONTEIRO et al., 2009). Dentre as várias soluções em reforços destacam-se o emprego das fibras naturais, devido às características como: biodegradabilidade, elevada resistência e módulo específico, baixo custo, baixa densidade, não abrasivas, atóxicas, abundância e fontes renováveis, além de ser facilmente modificadas por agentes químicos (VIEIRA, 2013). A fibra natural lignocelulósica de fique vem sendo extensivamente investigada recentemente, bem como melhorias moderadas nas suas propriedades mecânicas quando empregadas como reforço em compósitos poliméricos (DELVASTO, PERDOMO e GUIÉRREZ, 2010; MINA-HERNANDEZ, 2012; MUÑOZ-VELEZ, HIDALGO-SALAZAR e MINA-HERNANDEZ, 2014; ALTOÉ, 2016; PEREIRA, 2017). As aplicações desses compósitos se estendem a produção de laminados para construção (DELVASTO, PERDOMO e GUIÉRREZ, 2010).

Neste estudo, outra valiosa alternativa de aplicação de fibra de fique é demonstrada, para blindagem balística. Atualmente, nenhum material apresenta, isoladamente, as propriedades necessárias para suportar as tensões resultantes de um impacto balístico como o de nível III, exceto no caso de grandes espessuras. Uma solução é a fabricação de sistemas de blindagem multicamada, que combinam as propriedades de diferentes materiais. A Fig. 1 um sistema de blindagem multicamada. Na camada frontal, um material cerâmico é capaz de resistir à carga de compressão da chegada do projétil e de fragmentar a sua ponta, absorvendo grande parte da energia. A energia residual dos fragmentos do projétil e da cerâmica é absorvida por outra camada, que pode ser formada por materiais poliméricos e/ou metálicos. Uma terceira camada também pode ser considerada. Para estas camadas posteriores, em geral, pode ser usado alumínio aeronáutico, fibras de aramida, entre outros materiais (DA SILVA et al., 2014; MEDVEDOVSKI, 2010; MONTEIRO et al., 2014; SERJOUET et al. 2015).

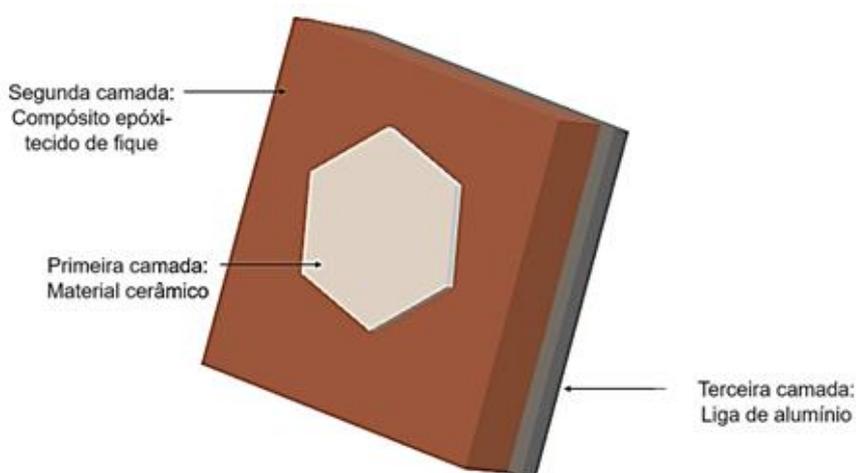


Figura 1. Esquema de uma blindagem multicamadas.

Desta forma, o tecido de fique foi incorporado em compósito epoxídico para aplicação em blindagem balística. Placas de epóxi reforçadas com aproximadamente 15, 30, 40 e 50% em volume de tecido de fique foram

usadas como segunda camada em blindagens multicamadas e foram submetidas a testes balísticos contra munição de 7,62 mm. Os resultados da profundidade de indentação, foram analisados usando a estatística Weibull, e comparados aos resultados com outros materiais de aplicação convencional como segunda camada em blindagens semelhantes. Também foram realizados teste de velocidade residual para avaliar a energia absorvida pela segunda camada, de forma monolítica, assim como, ensaios mecânicos, dinâmicos e térmicos para a caracterização da influência das diferentes frações volumétricas do tecido de fique como reforço em compósitos.

## **OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de blindagem pessoal com novos materiais envolvendo tecido de fique, avaliar seus comportamentos balísticos de sistemas de blindagem multicamada de tal modo que possam ser utilizados para uso em coletes balísticos, fornecendo assim uma possibilidade de substituição da utilização de materiais nocivos ao meio ambiente, como é o caso do tecido de aramida, de uso convencional em blindagem balística.

## **JUSTIFICATIVA**

O presente trabalho propõe a investigação de tecido de fique como reforço em compósitos poliméricos; e motiva a substituição dos tecidos de fibra sintética convencionalmente utilizadas. Essas fibras sintéticas possuem vida útil limitada (5 anos), e são importadas (culminando em elevado custo) por estes compósitos reforçados fibras naturais lignocelulósicas (FNL) na camada intermediária. Tendo em vista as características tecnológicas, os estudos direcionados para o desenvolvimento de novos materiais que possam ser utilizados em sistemas de blindagem multicamada são essenciais para o Exército Brasileiro. Por este motivo, o departamento de Ciência dos Materiais do Instituto de Engenharia (IME) já realiza pesquisas na área de blindagem balística há mais de uma década. No contexto econômico, as fibras naturais lignocelulósicas possuem menor custo, alta disponibilidade, e geralmente, são mais leves quando comparadas às fibras sintéticas utilizadas atualmente em blindagem balística, tais como a aramida e o polietileno de ultra alto peso molecular. Portanto, os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas apresentam menores densidades, menor custo e apelo ambiental relevante. No cenário científico, justifica-se este trabalho pela caracterização de um novo material com aplicação em blindagem que possua um adequado desempenho balístico, integrando-se, dessa forma, ao banco de dados gerados para fibras naturais com aplicação em defesa militar. Além do entendimento das propriedades mecânica, dinâmica e térmica dos materiais compósitos produzidos.

## **METODOLOGIA**

O presente estudo compreendeu, basicamente, na caracterização da fibra de fique e seus compósitos, fabricação dos sistemas de blindagem multicamadas (SBMs) e testes balísticos apresentados nas Fig. 2 e Fig. 3. O processamento cerâmico foi iniciado pela mistura dos pós e ligante. Os componentes, tais como, a alumina, a nióbia, o fluoreto de lítio e o polietileno

glicol (PEG). A sinterização das amostras ocorreu em um forno modelo FE-1700 da INTI. A densidade, a densificação e a porosidade das cerâmicas sinterizadas foram obtidas a partir do ensaio de Arquimedes, de acordo com a norma ABNT NBR 6220:2011.

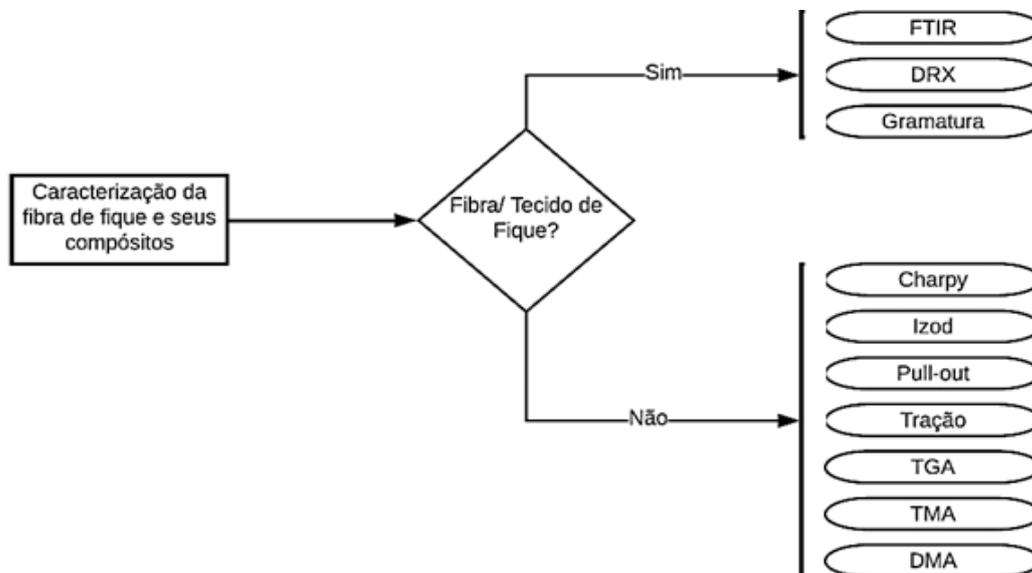


Figura 2. Fluxograma da etapa de caracterização da fibra de fique e seus compósitos.

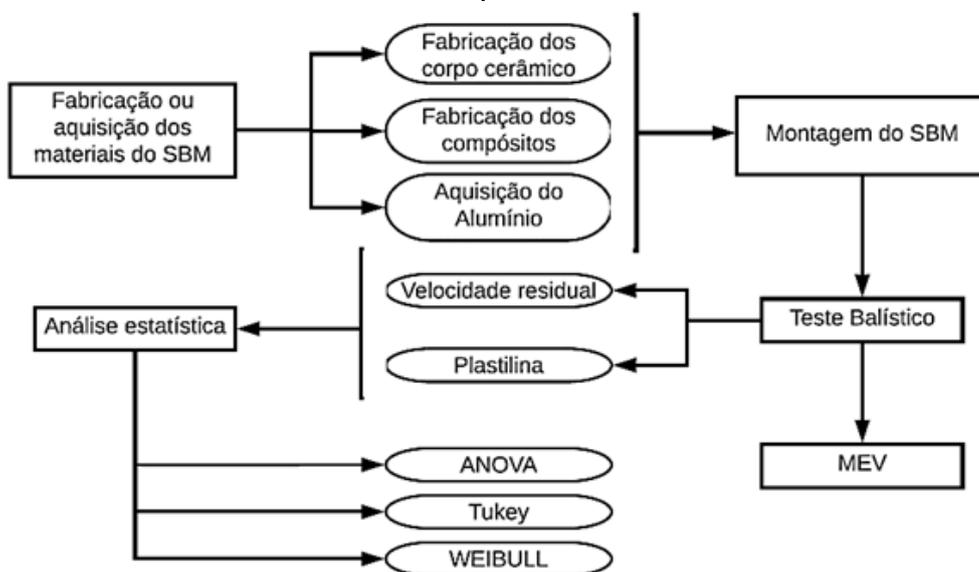


Figura 3. Fluxograma das etapas de fabricação dos SBMs e testes balísticos.

De posse dos valores das massas imersa, úmida e seca, foi possível calcular o volume aparente ( $V_{ap}$ ), representa o volume do material sólido mais o volume dos poros abertos e fechados (Eq. 1); a porosidade aparente ( $P_{ap}$ ), quociente do volume dos poros abertos do corpo de prova pelo volume aparente do mesmo (Eq. 2); e a densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ), representada pelo quociente da massa do corpo de prova seco pelo volume aparentes (Eq. 3).

Adotou-se o valor de 1,0 g/cm<sup>3</sup> para a densidade da água ( $\rho_{liq}$ ) utilizada no ensaio.

$$V_{ap}(cm^3) = \frac{m_u - m_i}{\rho_{liq}} \quad \text{Eq. 1}$$

$$P_{ap}(\%) = \left( \frac{m_u - m_s}{\rho_{liq} \times V_{ap}} \right) \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

$$\rho_{ap}(g/cm^3) = \frac{m_s}{V_{ap}} \quad \text{Eq. 3}$$

Sendo  $m_i$  massa imersa,  $m_u$  massa úmida,  $m_s$  massa seca. A densificação (Eq. 4) foi obtida em termos percentuais em relação a massa específica teórica da mistura ( $Al_2O_3 + Nb_2O_5 + LiF$ ).

$$\text{Densificação} = \frac{\rho_{sinterizado}}{\rho} \times 100\% \quad \text{Eq. 4}$$

Para preparação dos compósitos, o tecido (Fig. 5) foi cortado nas dimensões de 15 x 12 cm<sup>2</sup> e os pedaços levados à estufa por 24h, a 60°C. Os compósitos reforçados com tecido de fique foram preparados nas proporções de 15, 30, 40, 50% em volume, correspondentes a 1, 2, 3 e 4 camadas de tecido, respectivamente.



Figura 5. Aspecto geral do tecido de fique

## **Caracterização da fibra de fique e seus compósitos**

### **Espectroscopia no Infravermelho (FTIR)**

As análises foram realizadas em um espectrofotômetro de modelo IR Prestige 21-FTIR-Shimadzu. Com a varredura numa faixa espectral de 4000 a 400 cm<sup>-1</sup> com 32 scans.

### **Difração de raios X (DRX)**

O ensaio foi realizado em um difratômetro de Raios X de modelo X'Pert Pro Panalytical, com fonte de radiação CuK $\alpha$ , voltagem de 40 kV, corrente de 40 mA, varredura de 0,05 (2 $\theta$ /5s) para valores de 2 $\theta$  entre 10 e 70 $^\circ$ .

### **Determinação da gramatura ou densidade superficial do tecido**

O ensaio de determinação da densidade superficial do tecido de fique foi realizado conforme a norma NBR 10.591:2008, utilizando um gabarito metálico para determinar a área (m $^2$ ) da amostra e uma balança de precisão Mettler, modelo PM 460. A densidade superficial ou gramatura do tecido foi calculada por meio da Eq. 5.

$$D = \frac{M}{A} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde D é a densidade superficial do tecido (g/m $^2$ ); M é a massa total da amostra (g); A é a área da amostra (m $^2$ ).

### **Impacto Charpy e Izod**

Os ensaios de impacto Charpy foram realizados com o equipamento Tinius Olsen modelo IT542, conforme a norma ASTM D6110. E os ensaios de impacto Izod foram realizados com o equipamento PANTEC modelo XC-50, conforme a norma ASTM D256. O objetivo em ambos os ensaios foi obter a energia de fratura em Joules por metro (J/m). As placas compósitas foram cortadas dando origem a cinco corpos de prova de cada fração considerada com dimensões 127x12,7x10 mm $^3$  e 63,5x12,7x10 mm $^3$ .

### **Pullout da fibra de fique**

As fibras foram utilizadas na sua condição como recebidas, foram limpas e secas a 60 $^\circ$ C por 24 horas. Os ensaios foram realizados com o equipamento Instron 3365 com célula de carga de 25 kN, operando com velocidade de ensaio de 1 mm/min. O comprimento L incorporado pela resina polimérica variou de 3 a 20 mm, a fim de gerar uma tensão de arrancamento à tração versus curva L.

### **Tração do compósito epoxídico reforçado com tecido de fique**

Os ensaios foram executados em uma máquina universal Instron 3365 com célula de carga de 25 kN. As dimensões dos corpos de prova e o ensaio seguiram a norma ASTM D638:2014. A preparação das amostras nas proporções 30, 60 e 90 vol% seguiu o mesmo processo de fabricação do compósito para o SBM, acrescido do corte e acabamento para obtenção das dimensões finais para o ensaio de tração.

### **Análise termogravimétrica (TGA)**

As análises termogravimétricas dos compósitos foram realizadas conforme ASTM E1131 em um analisador termogravimétrico da marca Shimadzu, modelo DTG-60H. As amostras foram submetidas a análise por termogravimetria (TGA), sob fluxo de nitrogênio com taxa de aquecimento de 10 $^\circ$ C/min em um intervalo de temperatura de 10 $^\circ$ C até 500 $^\circ$ C.

### **Análise termomecânica (TMA)**

As medidas dos coeficientes de expansão térmica foram realizados no analisador termomecânico da marca Shimadzu, modelo TMA-60. As amostras foram cortadas conforme a norma ASTM E831. Foi aplicada uma atmosfera de nitrogênio, com um intervalo de temperatura de 10°C até 180°C. Para tais ensaios foi utilizada uma carga fixa de compressão de 10gf.

### **Análise dinâmico-mecânica (DMA)**

Para análise de DMA foram preparados corpos de prova retangulares de tecido com resina epóxi, medindo 50x13x5 mm. Todo o procedimento seguiu o previsto na norma ASTM D4065 e o modo de ensaio foi em um equipamento de DMA TA Instruments modelo operacional Q/800, em um modo de flexão de três pontos a 1 Hz de frequência e taxa de aquecimento de 3°C/min sob atmosfera de nitrogênio. As curvas de variação de E', E'' e tanδ com a temperatura foram simultaneamente registradas entre -50 e 180°C.

### **Avaliação do comportamento balístico**

#### **Velocidade residual**

O ensaio de velocidade residual (Fig. 6) teve o objetivo de avaliar a energia absorvida pela camada intermediária da blindagem multicamada após o impacto do projétil 7,62 mm. Para isso foi utilizado um radar Doppler WEIBEL SL-520P. O cálculo foi realizado a partir das Eq. 6 e Eq. 7, considerou-se 8 disparos para a avaliação da velocidade residual.

$$E_{ABS} = \frac{1}{2} m(V_I^2 - V_R^2) \quad \text{Eq. 6}$$

$$V_L = \sqrt{\frac{2E_{ABS}}{m}} \quad \text{Eq. 7}$$

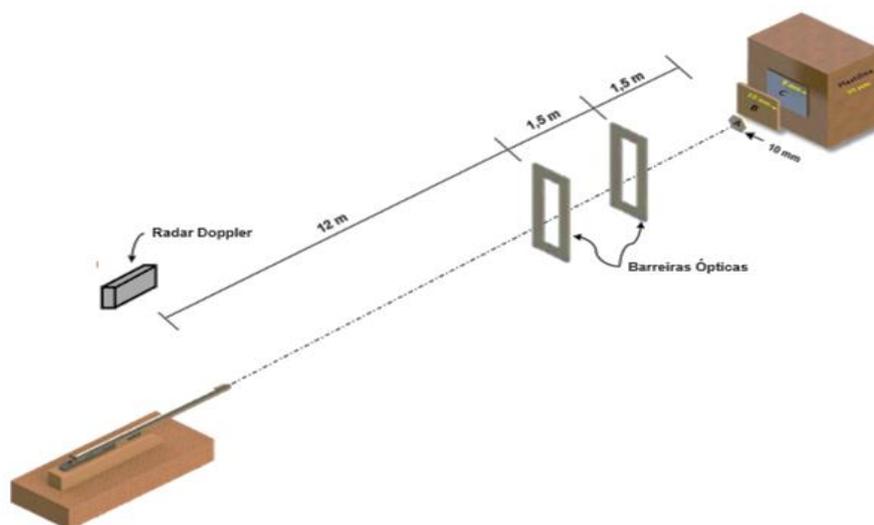


Figura 7. Esquema do sistema com barreira óptica modelo B471 da HPI.

### **Deformação na plastilina (*Backface signature - BFS*)**

Os ensaios de deformação na plastilina (*Backface Signature – BFS*) foram realizados para a avaliação do nível da proteção balística alcançada pela blindagem multicamada, correlacionado o desempenho com a medida da deformação provocada na plastilina pelo disparo. A caracterização da eficiência balística foi a medida da profundidade da deformação na plastilina após o impacto, sendo considerada eficiente se o valor for igual ou inferior a 44 mm.

### **Análise fractográfica**

A caracterização morfológica da fratura dos materiais é muito importante na definição das causas de sua falha. Essa análise serve para confirmar ou remover suspeitas sobre os modos de falhas e geralmente é feita com auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV). O equipamento utilizado foi um Quanta FEG 250 da FEI, operando de 15 a 20 kV, usando elétrons secundários.

### **Casamento de impedâncias de choque**

Com a finalidade de determinar os valores de pressão e de velocidade de partícula nas interfaces entre os materiais envolvidos nos impactos balísticos, foi utilizada a técnica do casamento de impedâncias de choque. Estas grandezas são obtidas a partir da interseção de curvas características de cada material (curvas Hugoniot), considerando os alvos impactados e os que realizarão o impacto. A curva Hugoniot característica dos materiais que sofrerão o impacto, chamada de Hugoniot Direta, é apresentada na Eq. 8.

$$P = \rho_0(C_0 + SU_p)U_p$$

Eq. 8

A curva Hugoniot característica para materiais que realizarão o impacto, chamada de Hugoniot Invertida, é apresentada na Eq. 9.

$$P = \rho_0 [C_0 + S(V_{imp} - U_P)](V_{imp} - U_P) \quad \text{Eq. 9}$$

### Análise estatística

A distribuição de Weibull é a distribuição estatística mais popular para cálculos de engenharia de confiabilidade. A grande vantagem do trabalho de confiabilidade é que, ajustando os parâmetros de distribuição, ele pode ser adaptado a muitas distribuições (O'CONNOR & KLEYNER, 2012). A função de distribuição cumulativa de Weibull é dada pela Eq. 10.

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\theta}\right)^\beta\right] \quad \text{Eq.10}$$

Onde  $\theta$  é a unidade característica de Weibull ou parâmetro de escala,  $\beta$  é o módulo de Weibull ou parâmetro de forma. Redefinindo-se a Eq. 10, é obtida a Eq. 11.

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(x)}\right)\right] = \beta \ln(x) - [\beta \ln(\theta)] \quad \text{Eq. 11}$$

A EQ. 3.11 consiste de uma reta com coeficiente angular igual a  $\beta$  e coeficiente linear igual a  $-\beta \ln(\theta)$ . Deste modo, os parâmetros podem ser obtidos com relativa facilidade, através de um método gráfico, desde que os dados sejam ordenados de forma crescente (O'CONNOR & KLEYNER, 2012). O modelo de Weibull foi utilizado neste trabalho para quantificar a confiabilidade estatística de alguns parâmetros medidos.

A Análise de Variância (ANOVA) é um procedimento para comparar três ou mais tratamentos das propriedades medidas em ensaio mecânico e balístico, utilizando-se a distribuição por amostragem da estatística "F" de Snedecor que é um método eficaz para identificar diferenças entre médias. O nível de confiabilidade para todos os testes foi de 95%. A interpretação da análise é realizada através do valor obtido de "F", de modo que, quando o  $F_{calculado} > F_{tabelado}$ , rejeita-se a hipótese de nulidade da hipótese ( $H_0$ ) de que as médias são iguais, ou seja, existe evidências de diferença significativa entre pelo menos um par de médias de tratamentos, ao nível de 5% de

significância. Caso contrário, não se rejeita a hipótese de nulidade ( $H_0$ ) de que as médias são iguais, ou seja, sem evidências de diferença significativa entre tratamentos, ao nível de 5% de significância.

## RESULTADOS

Os valores médios de densidade geométrica, espessura, densificação e porosidade do material cerâmico são mostrados na Tabela 1. A densificação média foi calculada pela relação entre a densidade média do sinterizado e a massa específica teórica da cerâmica ( $3,99 \text{ g/cm}^3$ ), obtida pela regra das misturas, utilizando os valores de densidade da alumina ( $3,98 \text{ g/cm}^3$ ), da nióbia ( $4,60 \text{ g/cm}^3$ ) e do fluoreto de lítio ( $2,63 \text{ g/cm}^3$ ). Valores similares de densidade e densificação também foram obtidos por Santos (2016) para este material cerâmico  $[(\text{Al}_2\text{O}_3 + 4\%\text{Nb}_2\text{O}_5) + 0,5\%\text{LiF}]$ , sinterizada a  $1400^\circ\text{C}$  por 3h, cujos valores foram respectivamente  $3,757 \pm 0,008 \text{ g/cm}^3$  e  $93,98 \pm 0,19\%$ .

Tabela 1. Propriedades das amostras cerâmicas sinterizadas.

| Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ ) | Espessura (mm)     | Densificação (%)   | Porosidade (%)    |
|--------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| $3,618 \pm 0,099$                    | $10,118 \pm 0,081$ | $90,506 \pm 2,487$ | $2,740 \pm 0,665$ |

Para o ensaio de velocidade residual totalizaram 7 amostras, todos os disparos foram válidos, de acordo com a velocidade mínima determinada pela NIJ 0101.04 (2000) para blindagem nível III, para munição 7,62 mm. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios das velocidades de impacto e residual, e energia absorvida.

| Amostras Hexagonais (10x31 mm – 100 g)   | $V_i$ (m/s) | $V_r$ (m/s) | $E_{abs}$ (J) | $\%E_{abs}$ | Ref.  |
|--|-------------|-------------|---------------|-------------|---|
| $[\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}4\%\text{Nb}_2\text{O}_5\text{-}0,5\%\text{LiF}]$ | 845         | 585         | 1792          | 53,33       | PT <sup>1</sup>                                       |
| $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}4\%\text{Nb}_2\text{O}_5$                          | 848         | 567         | 1928          | 56,60       | (MONTEIRO, LIMA JR, LOURO, DA SILVA, & DRELICH, 2014) |

### Amostras Cilíndricas ( $\Phi$ 57 mm – 60 g)

|   |     |     |      |    |                        |
|---|-----|-----|------|----|------------------------|
| [Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -4%Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ]-<br>0,5%LiF | 849 | 705 | 1085 | 31 | (Santos, et al., 2018) |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -4%Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                | 844 | 711 | 1003 | 29 |                        |

<sup>1</sup> Presente Trabalho

Comparativamente, observou-se que a energia absorvida pelo composto cerâmico com adição do fluoreto de lítio reduziu em aproximadamente 3% a absorção de energia do cerâmico.

### Espectroscopia no infravermelho (FTIR)

A Fig. 8 mostra a análise de IR da fibra com bandas características atribuídas aos principais componentes dos tecidos vegetais: celulose, hemicelulose e lignina. Os picos centrados em 3323 e 2966 cm<sup>-1</sup> são atribuídos às vibrações de estiramento O–H e C–H, respectivamente, presentes na celulose, hemicelulose e lignina. A celulose exibe duas bandas características: uma a 818 cm<sup>-1</sup> devido a ligações  $\beta$ -glicosídicas e outra a 1101 cm<sup>-1</sup> devido a vibrações na estrutura do anel de piranose C–O (OVALLE-SERRANO, BLANCO-TIRADO, & COMBARIZA, 2018). Além disso, os sinais em 1658 e 1265 cm<sup>-1</sup> correspondem às vibrações típicas da ligação C=O presentes na hemiceluloses e C–O–C das ligações éter aromáticas na lignina, respectivamente (MUÑOZ-VELEZ, HIDALGO-SALAZAR, & MINA-HERNANDEZ, 2014).

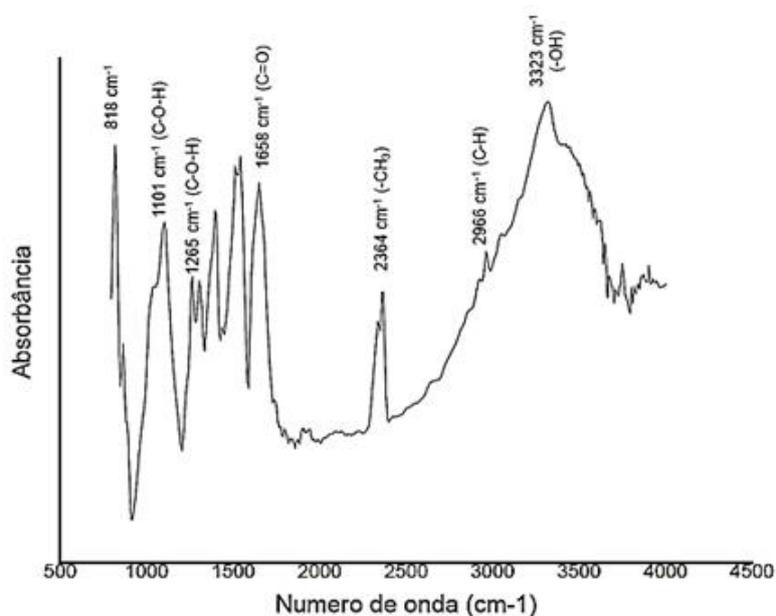


Figura 8. Espectro FTIR em modo absorbância.

### Difração de raios X

O difratograma de raios X das fibras de fique *in natura* (FIG. 4.2) apresenta comportamento típico de estrutura semicristalina, possuindo dois picos difusos referentes às fases amorfa e cristalina dos materiais. O pico de menor intensidade ( $I_{am}$  - *intensidade do campo amorfo*) é referente a fase amorfa e se encontra próximo de  $2\theta=16^\circ$ , já o pico mais elevado ( $I_{002}$  - *intensidade do pico 002*) está relacionado à fração cristalina e está próximo a  $2\theta=22^\circ$ .

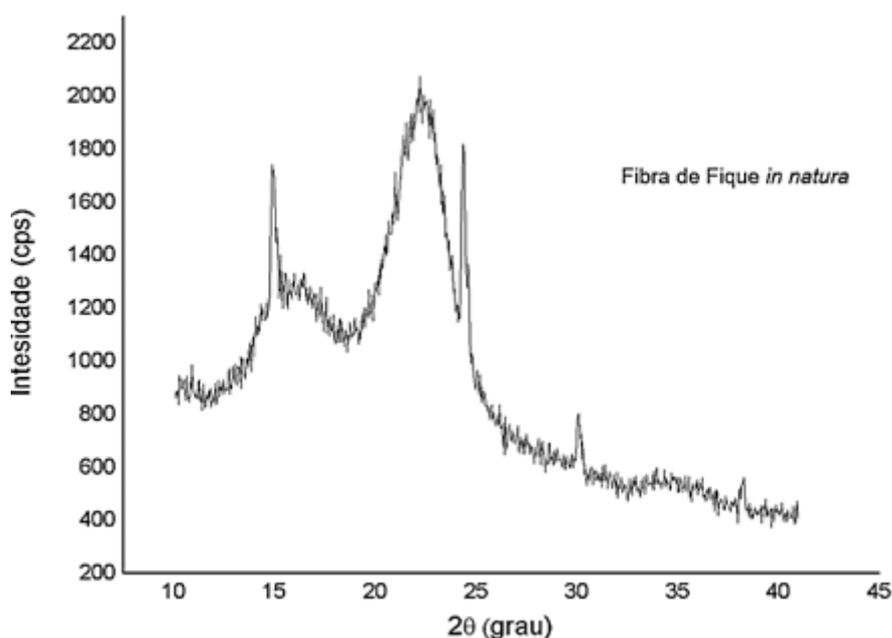


Figura 9. Difratograma de raios X das fibras de fique.

O índice de cristalinidade obtido das fibras é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros retirados do difratograma e índice de cristalinidade.

| Material               | $I_{am}$ | $I_{002}$ | $I_c$ |
|------------------------|----------|-----------|-------|
| Fibra <i>in natura</i> | 1330     | 2072      | 35,8  |

### Determinação da gramatura ou densidade superficial do tecido

A Tabela 4 apresenta a massa (g) e a área superficial (m<sup>2</sup>) das amostras de tecido de fique mostrando os valores da gramatura calculada.

Tabela 4. Densidade superficial do tecido de fique.

| Amostra | Massa (g) | Área (m <sup>2</sup> ) | Gramatura (g/m <sup>2</sup> ) | Gramatura média (g/m <sup>2</sup> ) |
|---------|-----------|------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 1       | 9,355     | 0,010                  | 935,500                       | 859,400 ± 66,500                    |
| 2       | 8,120     | 0,010                  | 812,000                       |                                     |
| 3       | 8,308     | 0,010                  | 830,800                       |                                     |

Na Figura 10 é mostrada a configuração do tecido de trama simples, bem como a superfície de uma fibra com superfície estruturada e heterogênea composta de fibrilas em camadas, e uma fibra fraturada mostrando sua estrutura interna e microfibrilas enroladas que são responsáveis pela excelente elasticidade e resistência mecânica da fibra (CASTELLANOS, BLANCO-TIRADO, HINESTROZA, & COMBARIZA, 2012).

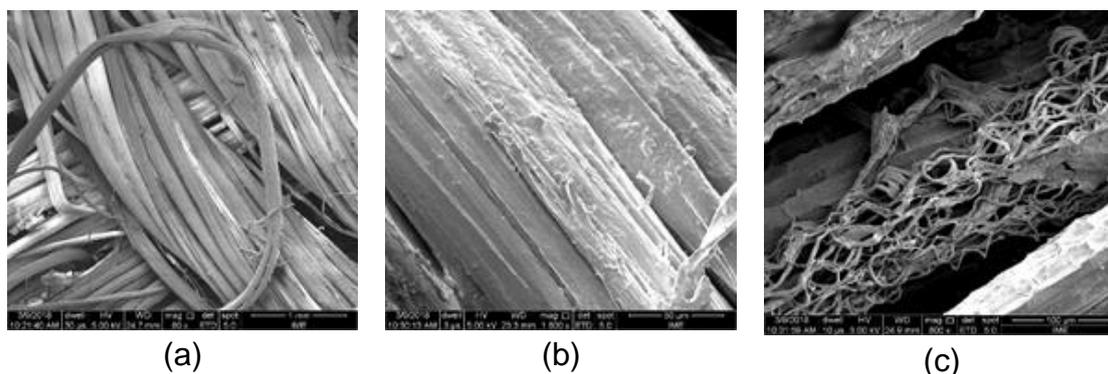


Figura 10. Imagem de MEV (a) da configuração do tecido (80x), (b) da superfície da fibra (1600x), e (c) uma fibra fraturada mostrando suas camadas internas e microfibrilas enroladas (400x).

### Ensaio de impacto Charpy e Izod

A Tabela 5 e a Fig. 11 mostram os valores de energia absorvida pelos compósitos submetidos ao ensaio de impacto, sendo considerado cinco amostras para cada grupo. A princípio, verifica-se que a fração do material (tratamento) influencia na energia absorvida, mas a confirmação foi obtida através da análise de variância.

Tabela 5. Energia absorvida pelos compósitos epóxicos mediante o impacto Charpy.

| <b>Energia absorvida média (J/m) – Ensaio Charpy</b> |                |                |                |                |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>CPs</b>   | <b>E-15%TF</b> | <b>E-30%TF</b> | <b>E-40%TF</b> | <b>E-50%TF</b> |
| 1  | 298,82         | 296,60         | 772,54         | 409,88         |
| 2  | 209,40         | 436,02         | 295,64         | 425,88         |
| 3  | 238,74         | 338,23         | 341,42         | 549,31         |
| 4  | 174,82         | 483,64         | 450,22         | 503,81         |
| 5  | 228,50         | 290,48         | 565,01         | 414,62         |
| <b>Média</b>   | <b>230,05</b>  | <b>368,99</b>  | <b>484,96</b>  | <b>460,70</b>  |
| <b>Desvio padrão</b>                                 | <b>45,51</b>   | <b>86,59</b>   | <b>191,55</b>  | <b>62,51</b>   |

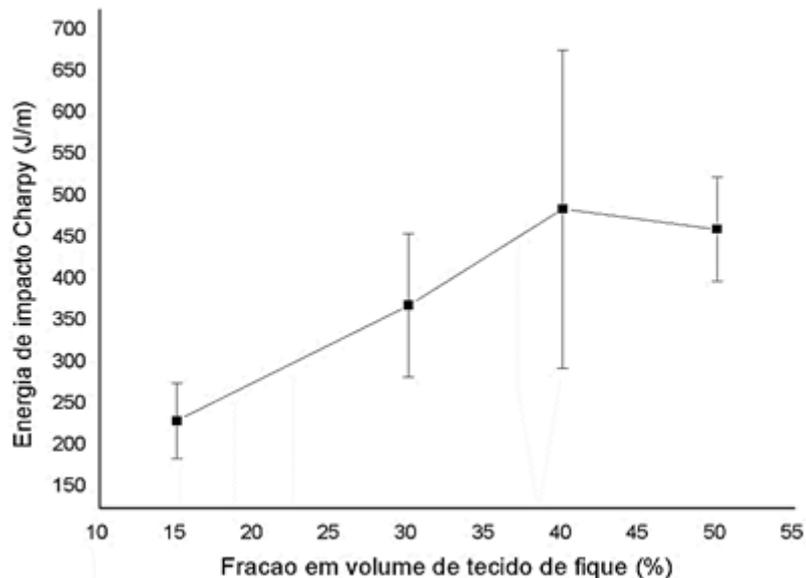


Figura 11. Variação da energia de impacto Charpy dos compósitos de matriz epóxi em função da fração em volume de tecido de fique.

Observa-se um alto desvio padrão para o compósito E-40%TF mostrado na Fig. 11. A Tabela 6 mostra a análise de variância dos dados, sendo

apresentados os graus de liberdade (GL), as somas de quadrados (SQ), os quadrados médios (QM), o F calculado e o parâmetro F crítico ou tabelado ( $F_c$ ).

Tabela 6. Análise de variância da energia absorvida por impacto Charpy.

| <b>Causas de variação</b> | <b>GL</b> | <b>SQ</b> | <b>QM</b> | <b>F</b> | <b>F<sub>c</sub></b> |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------------|
| Tratamentos               | 3         | 199910    | 66637     | 5,31     | 3,24                 |
| Resíduos                  | 16        | 200664    | 12541     | -        | -                    |
| Total                     | 19        | 400573    | -         | -        | -                    |

Comparando-se o valor de F com  $F_c$ , rejeita-se a hipótese de que as médias dos tratamentos são iguais, com 95% de confiança, uma vez que  $F > F_c$ . Ou seja, o tipo de material utilizado influencia na energia absorvida no impacto Charpy. Com base na análise de variância, é possível fazer a comparação das médias individuais pelo teste de Tukey. O valor de q para 4 tratamentos e 16 graus de liberdade para o resíduo é 2,12. Dessa forma a diferença mínima significativa (d.m.s.) foi calculada obtendo-se 150,16 J/m. A Tabela 7 mostra a comparação entre as médias pelo teste de Tukey.

Tabela 7. Comparação entre as médias de energia absorvida por impacto Charpy pelo teste de Tukey.

| <b>Compósito</b> | <b>E-15%TF</b> | <b>E-30%TF</b> | <b>E-40%TF</b> | <b>E-50%TF</b> |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>E-15%TF</b>   | -              | 138,94         | 254,91         | 230,64         |
| <b>E-30%TF</b>   | 138,94         | -              | 115,97         | 91,71          |
| <b>E-40%TF</b>   | 254,91         | 115,97         | -              | 24,27          |
| <b>E-50%TF</b>   | 230,64         | 91,71          | 24,27          | -              |

Os valores das diferenças de energia são dados em J/m. Os valores maiores que d.m.s. são apresentados em verde e negrito, e, do contrário, apresentados em vermelho. Pela análise das TAB. 4.6 e TAB. 4.8, observa-se que o material E-40%TF foi o de melhor resultado aparente, pois exibiu maior valor de energia média de impacto Charpy, contudo, o E-50%TF obteve menor desvio padrão, portanto, melhor confiabilidade. Os resultados dos ensaios de impacto Izod estão apresentados na Tabela 8 e na Figura 12, para cada condição foram ensaiadas cinco amostras.

Tabela 8. Energia absorvida pelos compósitos epóxicos mediante o impacto Izod.

| <b>Energia absorvida média (J/m) – Ensaio Izod</b> |                |                |                |                |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>CPs</b>   | <b>E-15%TF</b> | <b>E-30%TF</b> | <b>E-40%TF</b> | <b>E-50%TF</b> |
| 1  | 98,52          | 123,13         | 286,53         | 124,67         |
| 2  | 108,48         | 145,07         | 236,07         | 227,07         |
| 3  | 94,70          | 170,29         | 183,99         | 296,23         |
| 4  | 94,16          | 136,05         | 248,33         | 181,49         |
| 5  | 83,33          | 83,33          | 157,02         | 180,34         |
| <b>Média</b>                                       | <b>95,84</b>   | <b>131,58</b>  | <b>222,39</b>  | <b>201,96</b>  |
| <b>Desvio padrão</b>                               | <b>9,05</b>    | <b>32,01</b>   | <b>51,77</b>   | <b>63,99</b>   |

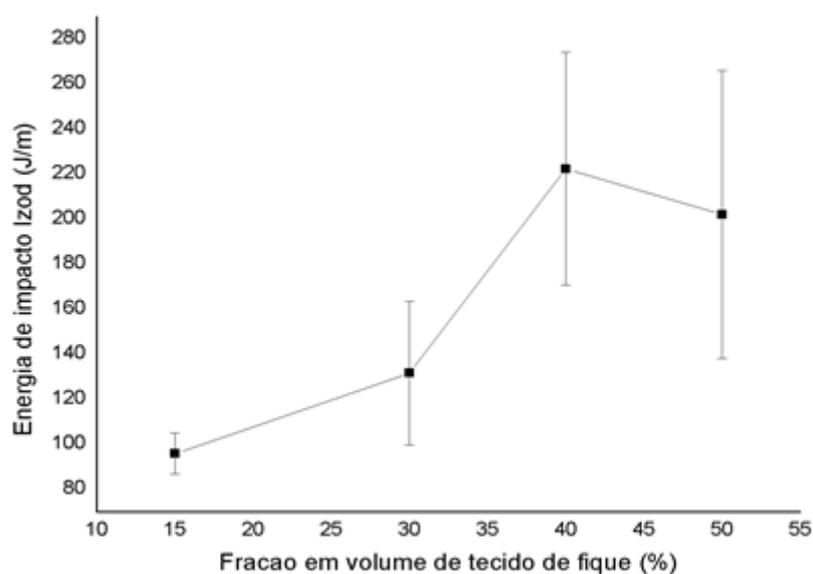


Figura 12. Variação da energia de impacto Izod dos compósitos de matriz epóxi em função da fração em volume de tecido de fique.

Nas Tabela 9 e 10 estão apresentadas a ANOVA e o teste de Tukey das amostras de impacto Izod, respectivamente.

Tabela 9. Análise de variância da energia absorvida por impacto Izod.

| <b>Causas de variação</b> | <b>GL</b> | <b>SQ</b> | <b>QM</b> | <b>F</b> | <b>F<sub>c</sub></b> |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------------|
| Tratamentos               | 3         | 52714     | 17571     | 8,92     | 3,24                 |
| Resíduos                  | 16        | 31528     | 1970      | -        | -                    |
| Total                     | 19        | 84242     | -         | -        | -                    |

Com base na Tabela 9 rejeita-se a hipótese de que as médias são iguais com nível de confiabilidade de 95%, pois  $F$  calculado (8,92) >  $F_c$  (3,24). Deste modo, é possível afirmar que a fração volumétrica de tecido de fique nos compósitos de matriz epóxi têm efeitos diferentes na energia de impacto Izod. Por este motivo, aplicou-se o teste de Tukey para comparação de médias. A diferença média significativa (d.m.s) encontrada foi de 59,52 J/m.

Tabela 10. Comparação entre as médias de energia absorvida por impacto Izod pelo teste de Tukey

| <b>Compósito</b> | <b>E-15%TF</b> | <b>E-30%TF</b> | <b>E-40%TF</b> | <b>E-50%TF</b> |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>E-15%TF</b>   | -              | 35,74          | 124,55         | 106,12         |
| <b>E-30%TF</b>   | 35,74          | -              | 90,81          | 70,38          |
| <b>E-40%TF</b>   | 126,55         | 90,81          | -              | 20,43          |
| <b>E-50%TF</b>   | 106,12         | 70,38          | 20,43          | -              |

Com base nesses resultados, verificou-se que os compósitos reforçados com tecido de fique apresentaram uma variação significativa na energia absorvida por impacto Izod. A explicação para este fenômeno está associada a propagação perpendicular a face de impacto, ou seja, as trincas se propagam preferencialmente entre a superfície do tecido de fique e matriz de epóxi (PEREIRA A. C., MONTEIRO, ASSIS, & COLORADO, 2017c). Com isso, a medida que aumenta a fração volumétrica de tecido de fique, aumenta a energia de impacto do sistema. Caso houvesse total ruptura, a energia absorvida seria ainda maior, em especial a composição E-50%TF, toma-se como indicativo de resultado. O aumento de energia absorvida pode estar associado à mudança do mecanismo de fratura ocasionado pela atuação das

fibras e do entrelaçamento do tecido que dificultam a propagação das trincas desviando seu percurso (BLEDZKI & GASSAN, 1999).

### Pullout da fibra de fique

A Figura 13 mostra a curva geral de pullout para fibras de fique. As linhas horizontais são indicativas do intervalo de 43 a 132,4 MPa reportado para a resistência à tração de fibras de fique sendo a mínima e a média, respectivamente (DELVASTO, PERDOMO, & GUIÉRREZ, 2010). É possível observar também o aumento linear da resistência a tração com o comprimento embutido da fibra na matriz.

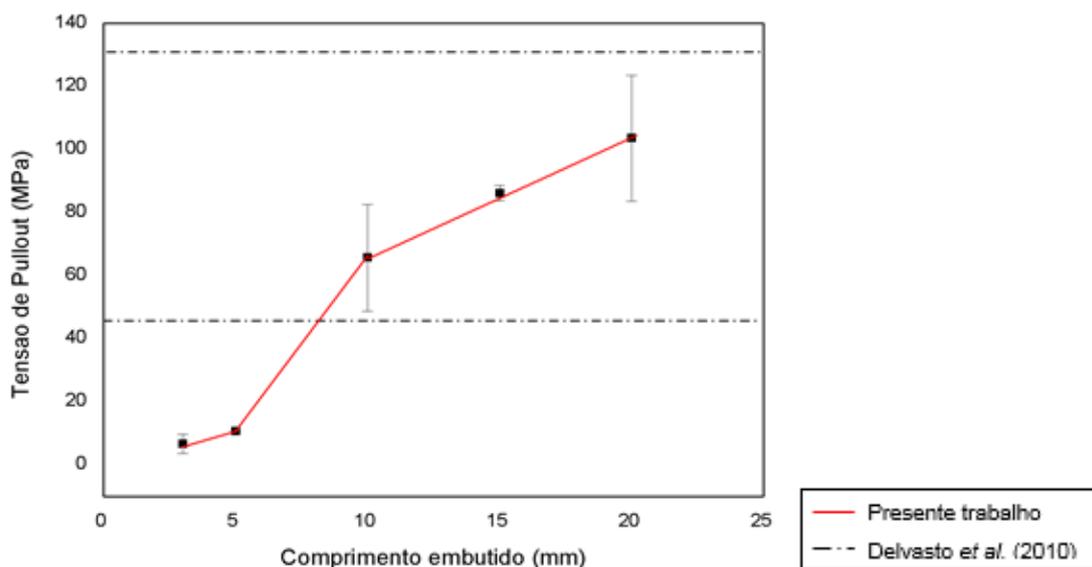


Figura 13. Curva de pullout para fibras de fique embutidas em resina epóxi.

É importante observar que a médias e as barras de erro das tensões associada ao comprimento embutido entre 10 e 20 mm estão no intervalo das horizontais de resistência à tração de fibras de fique. Isto é esperado, já que, para estes comprimentos embutidos, o término do ensaio de pullout ocorre preferencialmente por ruptura da fibra.

### Tração do compósito epoxídico reforçado com tecido de fique

Os testes de tração foram realizados com 1, 2 e 3 camadas, correspondendo a fração volumétrica de aproximadamente 30%, 60% e 90% de tecido de fique e os resultados encontrados são mostrados na TAB. 4.12.

Tabela 11. Resultados para o ensaio de tração de compósitos reforçados com tecido de fique.

| Quantidade de camadas | Percentual de tecido de fique | Resistência a tração (MPa) | Módulo de elasticidade (GPa) | Deformação média (%) |
|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------|
| 1                     | 30%                           | 46,63                      | 2,32                         | 5,36                 |
| 2                     | 60%                           | 112,80                     | 4,15                         | 6,05                 |
| 3                     | 90%                           | 101,20                     | 4,41                         | 5,56                 |

O gráfico da resistência à tração e do módulo de elasticidade dos compósitos epoxídicos reforçados com tecido de fique obtidos a partir das curvas Forças *versus* Alongamento e está apresentada na Fig. 14 (a) e (b), respectivamente.

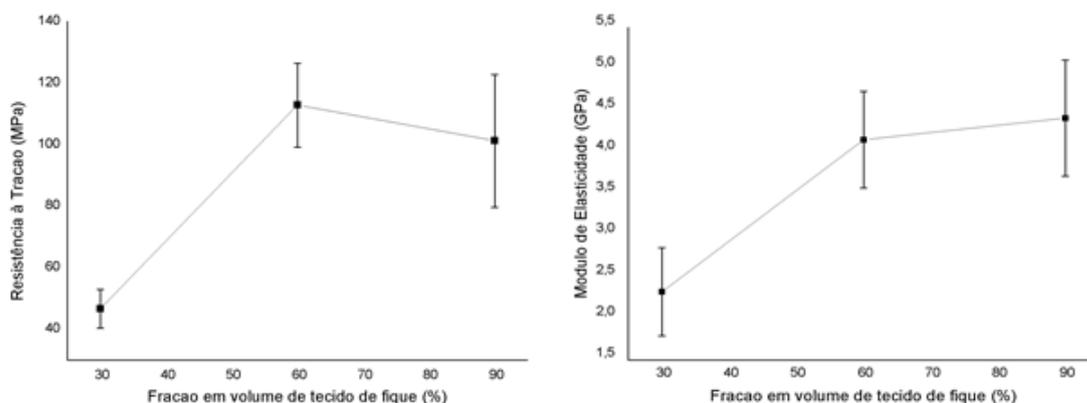


Figura 14. (a) Resistência à tração e (b) módulo de elasticidade dos compósitos epoxídicos reforçados com tecido de fique.

Os resultados apresentados mostram que a incorporação dos tecidos de fique gerou um aumento nos valores médios de resistência. Entre as composições E-30%TF e E-60%TF houve um aumento significativo na resistência à tração, e entre E-60%TF e E-90%TF, dentro de um erro estatístico, não apresentaram grande diferença na propriedade. Contudo, levando em consideração o módulo de elasticidade, houve aumento proporcional de rigidez conforme aumento da fração volumétrica de reforço.

### **Análise termogravimétrica (TGA)**

As Figura 15 a 18 exibem as curvas de análise termogravimétrica e suas derivadas de primeira ordem para as amostras do compósito epóxi/tecido de fique.

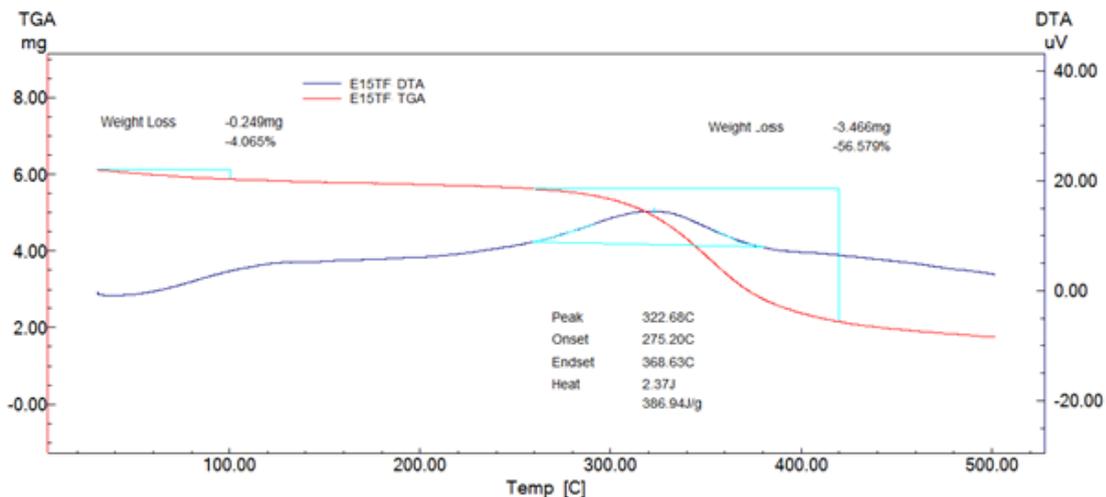


Figura 15. Curvas de TGA/DTG para o compósito de epóxi reforçado com 15% de tecido de fique.

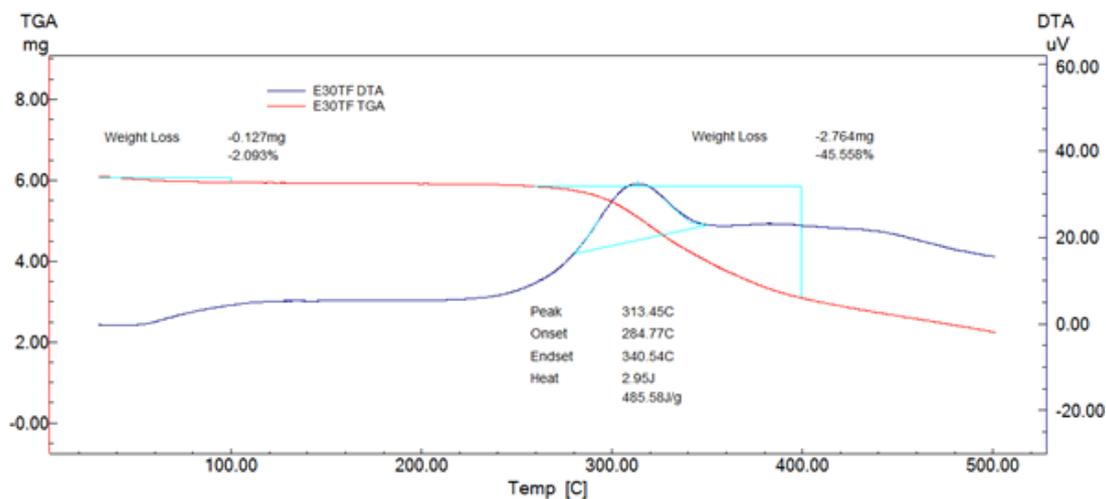


Figura 16. Curvas de TGA/DTG para o compósito de epóxi reforçado com 30% de tecido de fique.

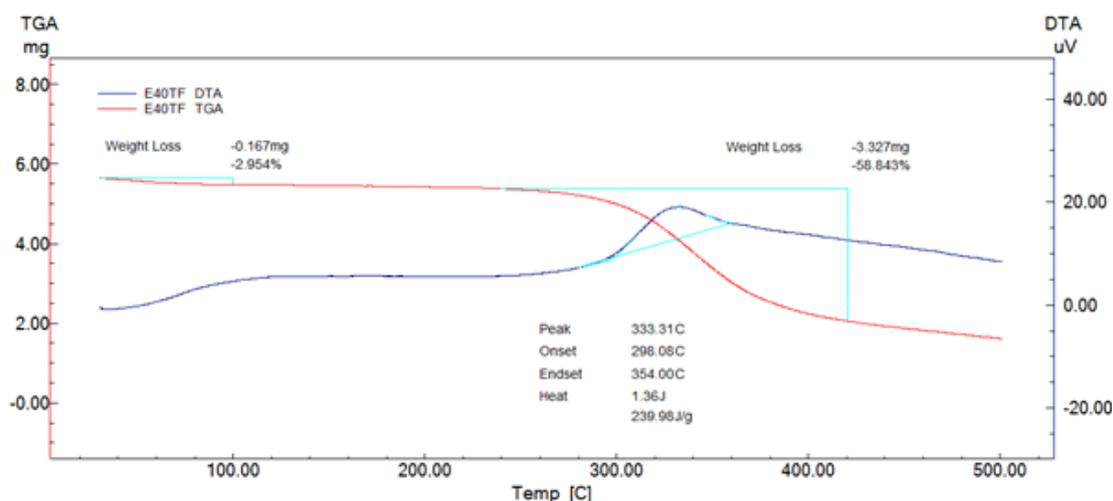


Figura 17. Curvas de TGA/DTG para o compósito de epóxi reforçado com 40% de tecido de fique.

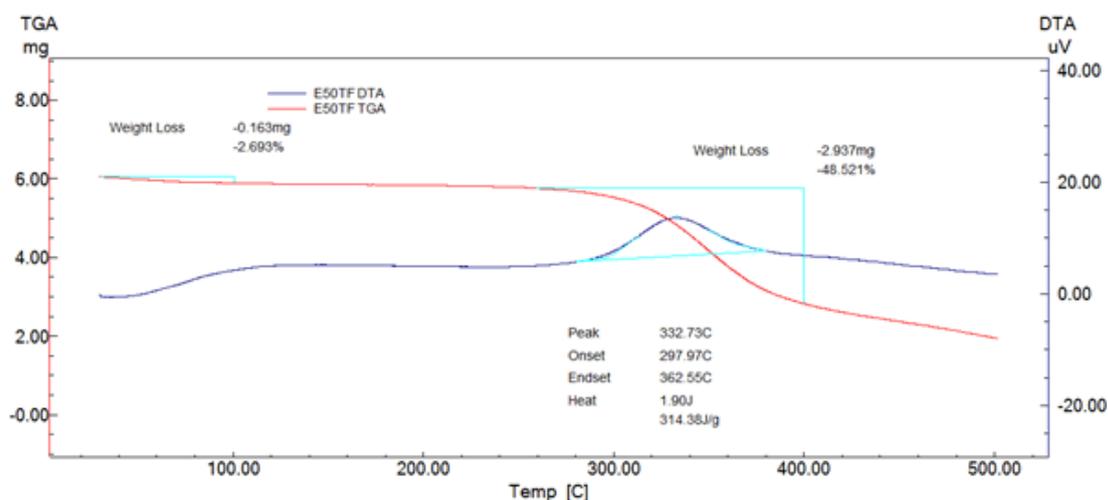


Figura 18. Curvas de TGA/DTG para o compósito de epóxi reforçado com 50% de tecido de fique.

Pode ser observado que ocorre uma pequena perda de massa (>4%) a temperatura em torno de 100°C. A maior redução de massa, cerca de 59%, ocorreu entre a temperatura de 260°C até próximo a 400°C para o compósito E-40%TF. A curva DTG mostra apenas um pico simétrico e uniforme relacionado a uma taxa máxima de perda de massa em 322,68°C; 313,45 °C; 333,31°C; e 332,73°C para as composições consideradas no presente estudo.

### Análise termomecânica (TMA)

A Figura 19 apresenta as curvas de TMA obtidas para o compósito de matriz epóxi reforçado com tecido de fique.

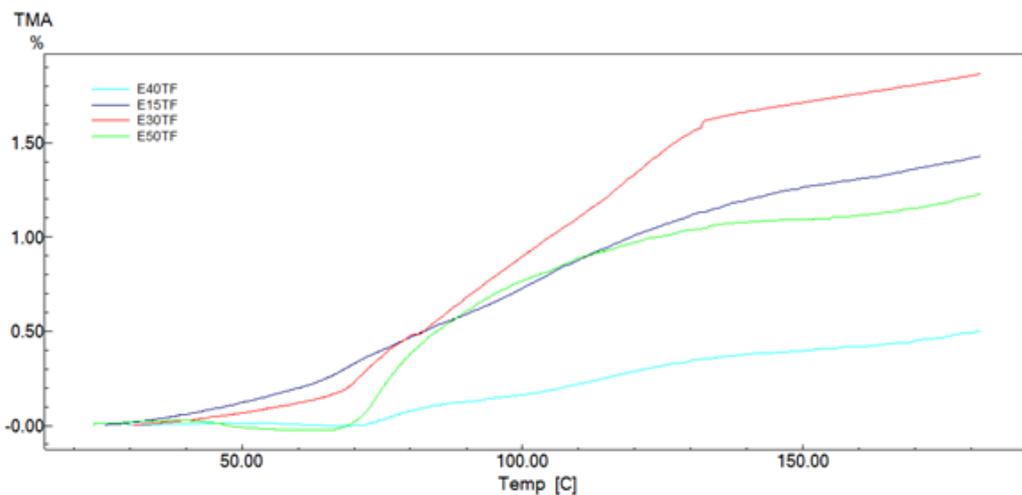


Figura 19. Comparação das curvas de TMA para os compósitos de matriz epóxi reforçado com tecido de fique.

As temperaturas de transição vítrea ( $T_g$ ) obtidas por TMA na ordem de aproximadamente  $131^\circ\text{C}$  para E-15%TF;  $133^\circ\text{C}$  para E-30%TF;  $139^\circ\text{C}$  para E-40%TF;  $134^\circ\text{C}$  para E-50%TF. É válido citar que possíveis problemas na determinação da  $T_g$  por TMA podem ocorrer devido a limitação de transferência de calor. Com o aumento da temperatura observa-se uma pequena dilatação do material. Todas as curvas de expansão térmica ficaram dispersas, contudo as variações totais foram pequenas, especialmente para E-40%TF, ou seja, muito próxima do limite de detecção do equipamento, por isso diminuiu a precisão da leitura, e o coeficiente de expansão térmica linear obtido através da equação da reta foi de  $1070.10^{-3}/^\circ\text{C}$  para E-15%TF;  $1670.10^{-3}/^\circ\text{C}$  para E-30%TF;  $390.10^{-3}/^\circ\text{C}$  para E-40%TF;  $1080.10^{-3}/^\circ\text{C}$  para E-50%TF.

### **Análise dinâmico-mecânica (DMA)**

A Fig. 20 a 23 apresenta as curvas dinâmico-mecânicas obtidas nos ensaios de DMA. São apresentadas as curvas de  $E'$ ,  $E''$  e  $\tan \delta$  dos compósitos de resina epóxi e tecido de fique.

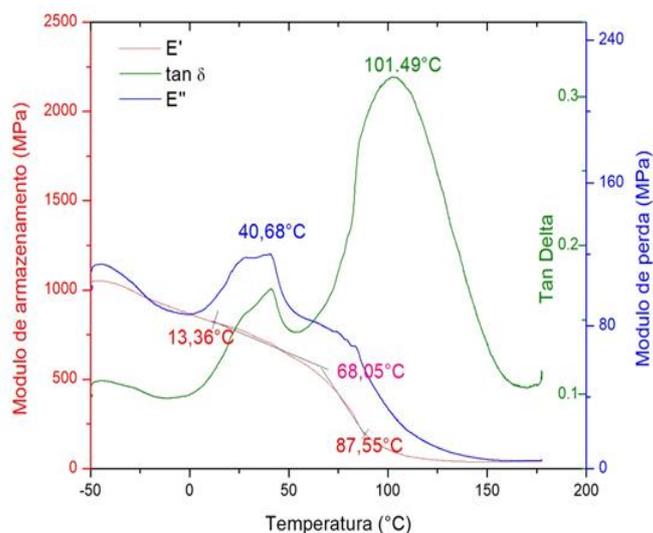


Figura 20. Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento ( $E'$ ), módulo de perda ( $E''$ ) e  $\tan \delta$  para amostra com 15% de tecido de fique.

O material E-15%TF apresenta uma  $T_g$  de aproximadamente  $68,05^\circ\text{C}$  por  $E'$ ,  $40,68^\circ\text{C}$  pelo pico  $E''$  e  $101,49^\circ\text{C}$  pelo pico  $\tan \delta$ . O módulo de armazenamento alcançou cerca de  $750\text{ MPa}$  a temperatura de  $25^\circ\text{C}$  e o módulo de perda em torno de  $120\text{ MPa}$  no seu ponto máximo. A determinação da temperatura de transição vítrea foi realizada adotando-se o método da ASTM E1640 que estabelece o material E-15%TF apresenta uma  $T_g$  de aproximadamente  $101,49^\circ\text{C}$ . Este método leva em consideração a  $T_g$  designada pelo maior pico evidenciado pela curva  $\tan \delta$ , visto que este parâmetro é a razão de  $E''$  (módulo viscoso) e  $E'$  (módulo elástico), e na literatura não há um consenso sobre a variável é a mais adequada a ser empregada.

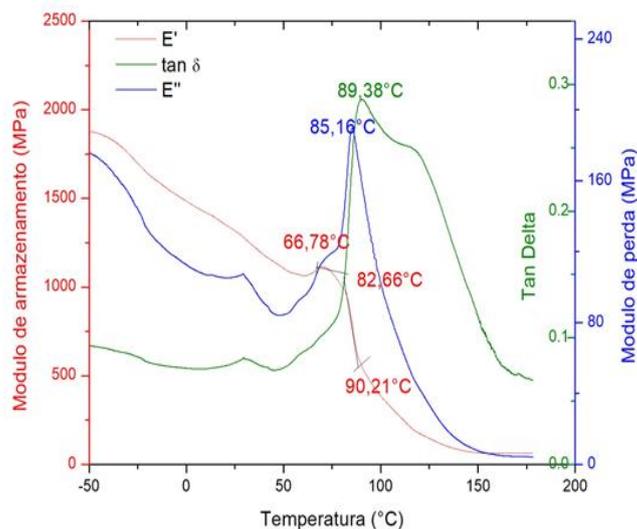


Figura 21. Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento ( $E'$ ), módulo de perda ( $E''$ ) e  $\tan \delta$  para amostra com 30% de tecido de fique.

O material E-30%TF apresenta uma  $T_g$  de aproximadamente 82,66 °C por  $E'$ , 85,16°C pelo pico  $E''$  e 89,38 °C pelo pico  $\tan \delta$ . O módulo de armazenamento alcançou cerca de 1300 MPa a temperatura de 25°C e o módulo de perda em torno de 180 MPa no seu ponto máximo.

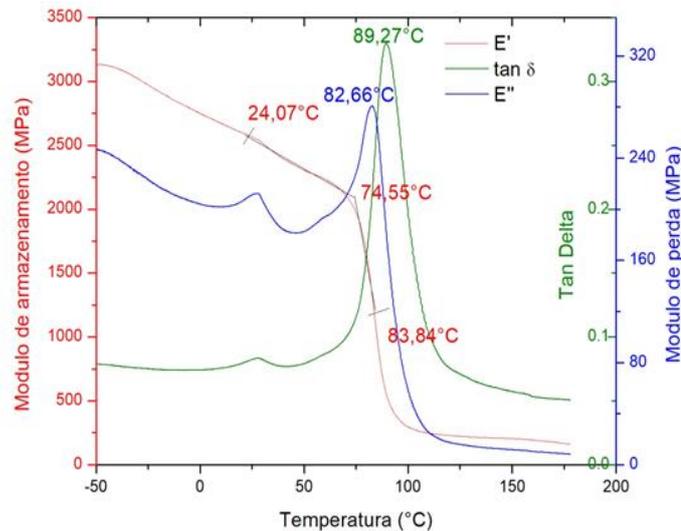


Figura 22, Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento ( $E'$ ), módulo de perda ( $E''$ ) e  $\tan \delta$  para amostra com 40% de tecido de fique.

O material E-40%TF apresenta uma  $T_g$  de aproximadamente 74,55 °C por  $E'$ , 82,66°C pelo pico  $E''$  e 89,27 °C pelo pico  $\tan \delta$ . O módulo de armazenamento alcançou cerca de 2500 MPa a temperatura de 25°C e o módulo de perda em torno de 280 MPa no seu ponto máximo.

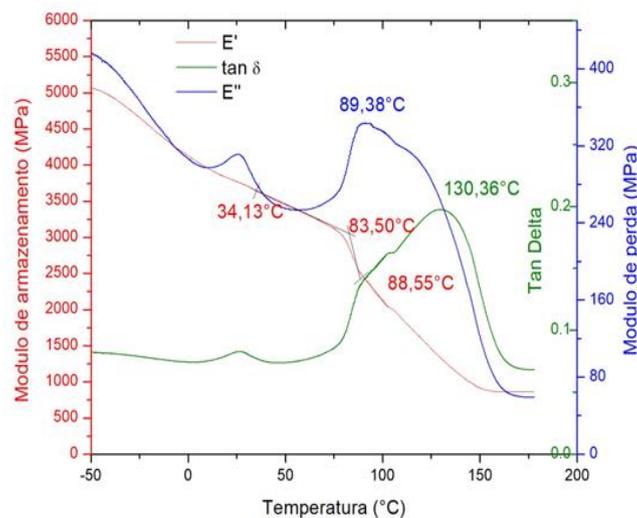


Figura 23. Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento ( $E'$ ), módulo de perda ( $E''$ ) e  $\tan \delta$  para amostra com 50% de tecido de fique.

O material E-50%TF apresenta uma Tg de aproximadamente 83,50 °C por E', 89,38°C pelo pico E'' e 130,36 °C pelo pico  $\tan \delta$ . O módulo de armazenamento alcançou cerca de 3750 MPa a temperatura de 25°C e o módulo de perda em torno de 350 MPa no seu ponto máximo. O pico de relaxação ( $\alpha$ ), representado pelo ponto máximo da curva do módulo de perda, variou entre 55°C e 89°C. Nesta composição o máximo de dissipação de calor por unidade de deformação é obtido, visto que esta possui a temperatura em que E'' é máximo.

### Desempenho balístico individual dos materiais da blindagem

Na Tabela 12 são apresentadas as análises de Weibull para os resultados do teste de velocidade residual e os gráficos estão apresentados na Figura 24.

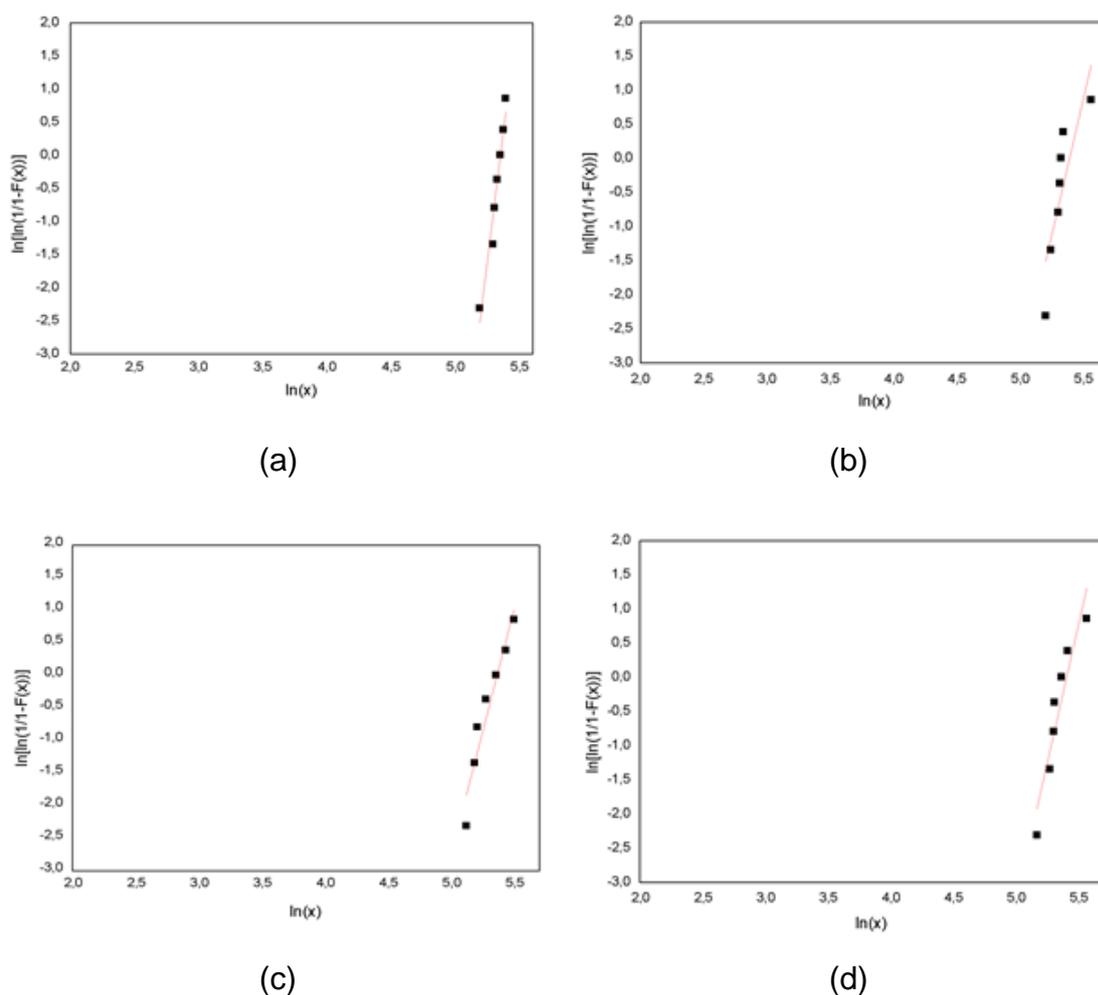


Figura 24. Gráfico de Weibull da velocidade limite para os compósitos (a) E-15%TF, (b) E-30%TF, (c) E-40%TF e (d) E-50%TF.

A unidade característica resultante da estatística de Weibull representa a velocidade limite ( $V_L$ ) para cada componente testado.

Tabela 12. Parâmetros de Weibull, média e desvio padrão da velocidade limite ( $V_i$ ) para os diferentes materiais.

| Material | Velocidade limite (m/s) | Desvio padrão | $\beta$ | $\theta$ | $R^2$ |
|----------|-------------------------|---------------|---------|----------|-------|
| E-15%TF  | 205                     | 13            | 15,71   | 210,24   | 0,96  |
| E-30%TF  | 206                     | 25            | 8,02    | 218,63   | 0,73  |
| E-40%TF  | 202                     | 28            | 7,53    | 213,82   | 0,93  |
| E-50%TF  | 211                     | 27            | 8,09    | 223,13   | 0,88  |

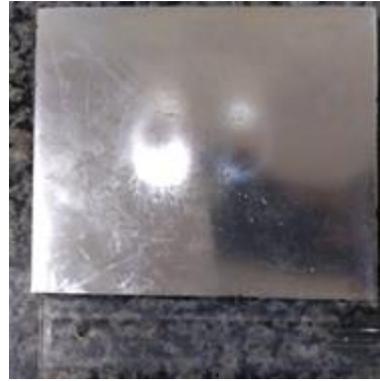
Com exceção do compósito E-30%TF que apresentou um valor inferior a 80% do coeficiente de correlação ( $R^2$ ), os demais componentes testados exibiram um ajuste entre 0,88 e 0,96, indicando que a distribuição apresenta alta representatividade estatística. Além disso, este resultado indica que para o compósito E-15%TF, com coeficiente de confiabilidade de 0,96 e módulo de Weibull de 15,71, possui maior homogeneidade se comparado com as demais frações de reforço.

### Desempenho balístico das blindagens multicamadas

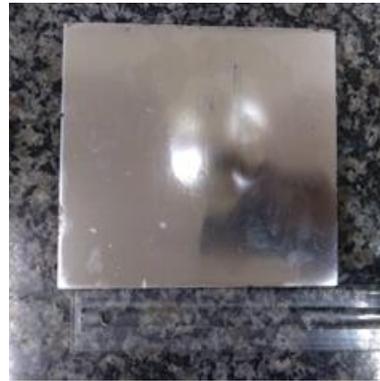
A Figura 15 mostra esta blindagem, antes e após o impacto balístico. Não houve perfuração em nenhuma das condições. A condição E-15%TF foi fragmentada entre duas e quatro partes, a E-30%TF foi fragmentada, em geral, em duas partes. No entanto, a separação das partes do compósito não foi completa. O E-40%TF e E-50%TF permaneceram coesos, sem fragmentação.



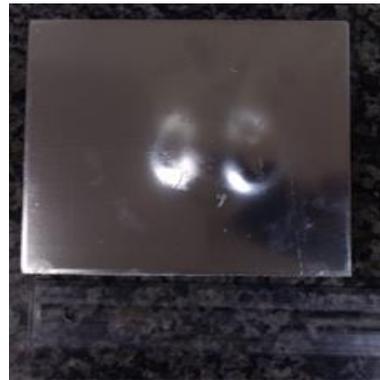
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 15. Blindagem multicamada com (a) 15, (b) 30, © 40 e (d) 50% de tecido de figue após o impacto balístico, mostrando a não perfuração da placa de alumínio.

Tabela 13. Parâmetros de Weibull, média e desvio padrão da indentação para a blindagem com epóxi reforçado com 50% de fique.

| Indentação | Média (mm) | Desvio padrão (mm) | $\beta$ | $\theta$ | R <sup>2</sup> |
|------------|------------|--------------------|---------|----------|----------------|
| E-15%TF    | 20,00      | 1,82               | 11,40   | 21,37    | 0,87           |
| E-30%TF    | 21,60      | 2,31               | 9,81    | 22,67    | 0,99           |
| E-40%TF    | 21,00      | 2,59               | 8,11    | 22,16    | 0,90           |
| E-50%TF    | 23,30      | 3,86               | 5,84    | 24,30    | 0,96           |

A Figura 16 apresenta um dos gráficos obtidos pelo método de casamento de impedância, analisando a interação das ondas de choque em cada interface do sistema de blindagem multicamada. Nela foi utilizado como camada intermediária o compósito de matriz epóxi reforçado com 50% de tecido de fique.

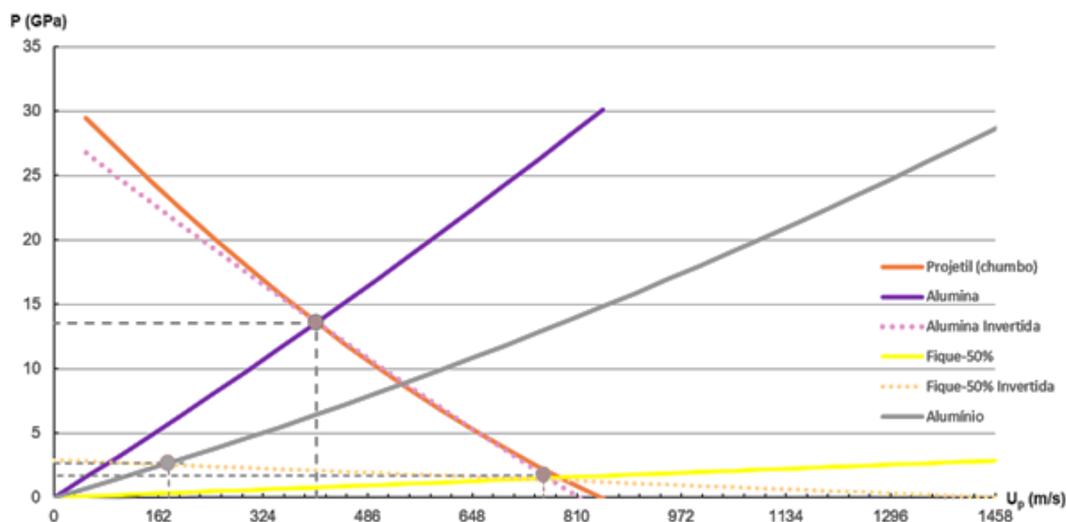


Figura 16. Gráfico do casamento de impedâncias na blindagem multicamada com compósito epóxi-fique como camada intermediária

A resolução dos cálculos nas interfaces pode ser resumida em três etapas: interface projétil/alumina, interface alumina/compósito, e interface

compósito/alumínio. O laminado de aramida apresentou o maior valor ( $4,49 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ), seguido dos compósitos reforçados com 50% de fique ( $1,83 - 2,29 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ), 40% de fique ( $1,90 - 2,29 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ), 30% de fique ( $1,86 - 2,15 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ) e 15% de fique ( $1,90 - 2,05 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ). A análise econômica revelou uma redução de aproximadamente 6% no peso da blindagem e uma redução da ordem de aproximadamente 68% no custo do SBM, levando em consideração a composição com 30% de reforço de tecido de fique, comparativamente ao sistema que utiliza o Kevlar™.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Todos os compósitos epóxi-tecido de fique atenderam aos requisitos da norma internacional NIJ 0101.04 (2000), ou seja apresentaram uma profundidade de indentação menor que 44 mm.
- O FTIR das fibras revelou a presença de grupos funcionais característicos dos principais constituintes das fibras naturais (celulose, hemicelulose e lignina).
- O ensaio de DRX possibilitou acrescentarmos informações na literatura sobre a cristalinidade da fibra de fique, a qual foi inferior a outras fibras naturais, e com bom desempenho balístico.
- Os ensaios de impacto Charpy e Izod revelaram que a energia de impacto aumentou com a fração volumétrica de tecido de fique. O valor máximo alcançado para ambos foi para o compósito E-40%TF.
- A determinação do comprimento crítico das fibras de fique por meio do ensaio de pullout revelou um comprimento crítico igual a 5 mm.
- Para o ensaio de tração, o aumento do teor volumétrico de tecido de fique no compósito, a partir de 60%, foi tomado como carga. O aumento das cargas produz regiões interfaciais mal dispersas, com falha na molhabilidade do tecido.
- Os ensaios de TGA/DTG mostraram para os compósitos de tecido de fique uma perda de massa (umidade) variando de 2 a 4% em torno  $100^\circ\text{C}$ . Os compósitos com 15, 30, 40 e 50% em volume de tecido de fique apresentaram uma estabilidade térmica até  $275^\circ\text{C}$  (Tonset), e a

máxima taxa em 368 °C (Tendset). A temperatura máxima de trabalho para o compósito considerada foi 200°C.

- Todas as curvas de expansão térmica ficaram dispersas, e as variações totais foram pequenas, especialmente para E-40%TF.
- O composto E-50%TF apresentou o maior efeito de reforço devido ao aumento da resistência e rigidez verificados nas curvas de DMA. Esses resultados enfatizam o alto potencial do tecido de fique como reforço em compósito epóxi e como material alternativo de baixo impacto ambiental.
- Os valores da velocidade limite (VL) e a energia absorvida (Eabs), para os compósitos epóxi-tecido de fique apresentaram valores em torno de 206m/s e 208J, respectivamente.
- Dentre os compósitos utilizados como camada intermediária em SBMs com tecido de fibra natural, o compósito epóxi-fique apresentou as menores impedâncias, e quanto a indentação, o material composto poliéster-juta foi aquele que exibiu menor trauma, seguido pelo compósito epóxi-fique.
- Como a alumina apresenta uma impedância de choque superior aos exibidos pelos compósitos epoxídicos reforçados com tecido de fique, ocorre a reflexão de um pulso trativo de elevada amplitude, provocando a fragmentação completa da cerâmica, de modo similar ao que acontece para o SBM com Kevlar™ como segunda camada.
- Considerando o compósito com 40% de reforço de tecido de fique, aquele que apresentou melhor desempenho balístico, e que apresenta redução de peso de 4,54% e custo de 67%, um resultado promissor junto aos demais compósitos epoxídicos reforçados com tecido de fique.

## REFERÊNCIAS

- [1] ABNT NBR 15000. Blindagens Para Impactos Balísticos - Classificação E Critérios De Avaliação. Rio De Janeiro: Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). 2005.
- [2] ABNT NBR 6220. Material refratário denso – determinação da densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida. 2011.
- [3] ABNT NBR ISO 5017. Produtos refratários conformados densos – Determinação da densidade de massa, porosidade aparente e porosidade real. 2015.

- [4] ABNT NBR 10591. Materiais Têxteis - Determinação da gramatura de superfícies têxteis. 2008.
- [5] ALTOÉ, G. R. Avaliação Da Influência Do Diâmetro, Por Meio Da Distribuição De Weibull, Nas Propriedades Mecânicas E Estruturais Da Fibra De Fique. Monografia De Graduação Do Curso Em Engenharia Metalúrgica E De Materiais Na Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. 2016.
- [6] ALVES, A. L., NASCIMENTO, L. C., & SUAREZ, J. C. Comportamento Balístico De Compósito De Polietileno De Altíssimo Peso Molecular: Efeito Da Radiação Gama. *Polímeros: Ciência E Tecnologia*. 14(2). 105-11. 2004.
- [7] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS E831. Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis. 2014.
- [8] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS D 256. Standard Test Method for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. 2006.
- [9] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS D 4065. Standard Practice for Plastics: Dynamic Mechanical Properties: Determination and Report of Procedures. 2012.
- [10] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS D 6110. Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics. 1997.
- [11] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS D 638. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. 2014.
- [12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS E 1131. Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry. 2014.
- [13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS E 1640. Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature By Dynamic Mechanical Analysis. 2013.
- [14] ARAÚJO, B. M. Avaliação Do Comportamento Balístico De Blindagem Multicamadas Com Compósito De Epóxi Reforçado Com Fibra Ou Tecido De Sisal. Dissertação De Mestrado Em Ciência Dos Materiais. Instituto Militar De Engenharia, Rio De Janeiro. 2015.
- [15] ARAÚJO, J. R.; WALDMAN, W. R., DE PAOLI, M. A. Thermal Properties Of High Density Polyethylene Composites With Natural Fibres: Coupling Agent Effect. *Polymer Degradation and Stability*. 93(10), p.1770 2008.
- [16] ASSIS, F. S. Comportamento Balístico De Blindagem Multicamadas Com Compósitos De Poliéster Reforçados Com Fibras De Juta. Dissertação De Mestrado Em Ciência Dos Materiais. Instituto Militar De Engenharia, Rio De Janeiro. 2016.
- [17] BARBOSA, F. M. Caracterização Mecânica E Térmica De Compósitos Naturais Modificados Com Ciclodextrina E Fibras Vegetais Utilizando Como Matriz Uma Resina Termofixa Dgeba/Teta. Tese De Doutorado. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2014.
- [18] BLEZKI, A. K., & GASSAN, J. Composites Reinforced With Cellulose Based Fibres. *Polymer Science*, 221-274. 1999.

- [19] BOLZAN, L. T. Avaliação Do Comportamento Balístico De Um Sistema De Blindagem Multicamada Com Compósito De Poliéster Reforçado Com Fibra E Tecido De Sisal. Dissertação De Mestrado Em Ciência Dos Materiais. Instituto Militar De Engenharia, Rio De Janeiro. 2016.
- [20] BRAGA, F. D. Comportamento Balístico De Uma Blindagem Multicamada Utilizando Compósito Poliéster-curauá Como Camada Intermediária. Dissertação De Mestrado Em Ciência Dos Materiais. Instituto Militar De Engenharia, Rio De Janeiro. 2015.
- [21] BRAGA, F. D., BOLZAN, L. T., JR., E. P., & MONTEIRO, S. N. Performance of natural curaua fiber-reinforced polyester composites under 7.62 mm bullet impact as a stand-alone ballistic armor. *Journal of Materials Research and Technology*, 6(4), 323-328. 2017.
- [22] BRAGA, F. D., JR., É. P., LIMA, E. D., & MONTEIRO, S. N. The Effect of Thickness on Aramid Fabric Laminates Subjected to 7.62 MM Ammunition Ballistic Impact. *Materials Research*, 20 Suppl. 2, 676-680. 2017.
- [23] CANDIDO, V.S. Caracterização e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. Tese de Doutorado em Ciências dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.
- [24] CARVALHO, K. C., MULINARI, D. R., VOONWALD, H. C., & CIOFFI, M. O. Preparação e Caracterização de Fibras de Bagaço de Cana Modificadas com Nanopartículas de Óxido de Zircônio. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, Campos do Jordão, SP, Brasil. 2010. 7726-7734p.
- [25] CASTELLANOS, L. J., BLANCO-TIRADO, C., HINESTROZA, J. P., & COMBARIZA, M. Y. In Situ Synthesis Of Gold Nanoparticles Using Figue Natural Fibers As Template. *Cellulose*, 1933-1943. 2012.
- [26] CHAGAS, C. F. Minimização Do Efeito De Aresta Em Blindagem Cerâmica À Base De Alumina. Tese De Doutorado Em Ciência Dos Materiais. Instituto Militar De Engenharia, Rio De Janeiro. 2014.
- [27] CHIMELLI, C. P., Processamento, caracterização e propriedades do carbetto de silício (SiC) obtido por sinterização em fase líquida. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2010.
- [28] COOPER, G., & GOTTS, P. *Ballistic Protection. Ryan's Ballistic Trauma: A Practical Guide* (978-1-84882-124-8 ed. Londres: Springer. 2011. 67-90p.
- [29] CRUZ, R. B., JUNIOR, E. P., MONTEIRO, S. N., & LOURO, L. H. Giant Bamboo Fiber Reinforced Epoxy Composite in Multilayered Ballistic Armor. *Materials Research*, 18(Suppl 2). 2015. 70-75p.
- [30] DA CRUZ, R. B. Avaliação Do Comportamento Balístico De Blindagem Multicamadas Com Compósitos De Epóxi Reforçados Com Fibras Ou Plaquetas De Bambu. Dissertação De Mestrado Em Ciência Dos Materiais. Instituto Militar De Engenharia, Instituto Militar De Engenharia, Rio De Janeiro. 2015.
- [31] DA LUZ, F. S. Avaliação Do Comportamento Balístico De Blindagem Multicamada Com Compósito De Epóxi Reforçado Com Fibra

- De Juta. Dissertação De Mestrado Em Ciência Dos Materiais. Instituto Militar De Engenharia, Rio De Janeiro. 2014.
- [32] DE MOURA, M.F.S.F.; MORAIS, A.B.; MAGALHÃES, A.G. Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico. 2ª ed. Porto: Publindústria Edições Técnicas. 2011.
- [33] D'ALMEIDA, J. R., & MONTEIRO, S. N. The Effect Of The Resin/Hardener Ratio On The Compressive Behavior Of An Epoxy System. *Polymer Testing* 15. 1996. 329-339p.
- [34] D'ALMEIDA, J. R., & QUINAYÁ, D. C. Tópicos Especiais De Ciências E Engenharia De Materiais. PUC-RJ. 2013.
- [35] DEDAVID, B., GOMES, C., & MACHADO, G. Microscopia eletrônica de varredura aplicações e preparação de amostras materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. Porto Alegre: EDIPUCRS. 2007.
- [36] DELVASTO, S., PERDOMO, E. F., & GUIÉRREZ, R. M. An Appropriate Vacuum Technology for Manufacture of Corrugated Fique Fiber Reinforced Cementitious Sheets. *Construction and Building Materials* 24. 2010. 187-192p.
- [37] FARUK, O.; BLEDZKI, A.K.; FINK, H. SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science*, nº 37, p.1552-1596. 2012.
- [38] FENGEL, D., & WEGENER, G. *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. 1989.
- [39] FORNARI, C. I., & JUNIOR, C. C. Avaliação Da Força De Cisalhamento De Fibras Longas De Piaçava Em Poliéster Insaturado. *Estudos Tecnológicos Em Engenharia*, 9(1). 2013. 27-36p.
- [40] GAÑÁN, P., & MONDRAGON, I. Surface Modification Of Fique Fibers. Effects On Their Physico-mechanical Properties. *Polymer Composites*. 2002. 383-394p.
- [41] GOMES, A. V. Comportamento Balístico Da Alumina Com Adição De Nióbia E Variação Da Geometria Do Alvo. Tese De Doutorado Em Ciência Dos Materiais. Instituto Militar De Engenharia, Rio De Janeiro. 2004.
- [42] JOHN, M. J., & THOMAS, S. Biofibres And Biocomposites. *Carbohydrate Polymers*. 2008. 343-364p.
- [43] JOVICIC, J. M. Numerical Modeling And Analysis Of Static And Ballistic Behavior Of Multi-layered/Multiphase Composite Materials Using Detailed Microstructural Discretization. Thesis. Faculty Of Drexel University. 2003.
- [44] KALIA, S., KAITH, B. S., & KAUR, I. *Cellulose Fibers: Bio- And Nano-polymer Composites*. Green Chemistry And Technology. SPRINGER. 2011.
- [45] LOURO, L. H., GOMES, A. V., & COSTA, C. R. Dynamic Fragmentation Alumina With Additions Of Niobia And Silica Under Impact. 19TH International Symposium Of Ballistics. 2001. 7-11p.
- [46] LUZ, F. S., JUNIOR, E. P., LOURO, L. H., & MONTEIRO, S. N. Ballistic Test of Multilayered Armor with Intermediate Epoxy Composite Reinforced with Jute Fabric. *Materials Research*, 18 (Supl 2). 2015. 170-177p.

- [47] LUZ, F. S., RAMOS, F. J., NASCIMENTO, L. F., FIGUEIREDO, A. B.-H., & MONTEIRO, S. N. Critical length and interfacial strength of PALF and coir fiber incorporated in epoxy resin matrix. *Journal of Materials Research and Technology*, 456.
- [48] MARINO, G., LANDIM, P. D., & PASCHOARELLI, L. C. Fios De Fique (*Furcraea Andina*): A Cultura Ao Redor De Um Tecido De Fibra Vegetal. 11º Colóquio De Moda - 8ª Edição Internacional - 2º Congresso Brasileiro De Iniciação Científica Em Design E Moda. 2015.
- [49] MEYERS, M.A. *Dynamic behavior of materials*. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [50] MILANEZI, T. L. Comportamento Balístico Da Fibra De Rami Em Blindagem Multicamadas. *Dissertação De Mestrado Em Ciência Dos Materiais*. Instituto Militar De Engenharia, Rio De Janeiro. 2015.
- [51] MOHANTY, A. K., MISRA, M., & DRZAL, L. T. Composites From Renewable Resources: Opportunities And Challenges In The Green Materials World. *Journal Of Polymers And The Environment*, 10. 2002. 19-26p.
- [52] MONTEIRO, S. N., & D'ALMEIDA, J. R. Ensaio De Pullout Em Fibras Lignocelulósicas - Uma Metodologia De Análise. *Revista Matéria*, 11(3). 2006. 189-196p.
- [53] MONTEIRO, S. N., BRAGA, F. D., LIMA, E. P., LOURO, L. H., & DRELICH, J. W. Promising Curaua Fiber-Reinforced Polyester Composite for High-Impact Ballistic Multilayered Armor. *Polymer Engineering and Science*. 2016.
- [54] MONTEIRO, S. N., CANDIDO, V. S., BRAGA, F. O., BOLZAN, L. T., WEBER, R. P., & DRELICH, J. W. Sugarcane bagasse waste in composites for multilayered armor. *European Polymer Journal*, 78. 2016. 173-185p.
- [55] MONTEIRO, S. N., LIMA JR, É. P., LOURO, L. H., DA SILVA, L. C., & DRELICH, J. W. Unlocking Function Of Aramid Fibers In Multilayered Ballistic Armor. *Metallurgical And Materials Transactions A*, 46A. 2014. 37-40p.
- [56] MONTEIRO, S. N., LOPES, F. P., BARBOSA, A. P., BEVITORI, A. B., DA SILVA, I. L., & DA COSTA, L. L. Natural Lignocellulosic Fiber As Engineering Materials - An Overview. *Metallurgical And Materials Transactions A*. 2011. 2963-2974p.
- [57] MONTEIRO, S. N., LOPES, F. P., FERREIRA, A. S., & NASCIMENTO, D. C. Natural-Fiber Polymer-Matrix Composites: Cheaper, Tougher, and Environmentally Friendly. *JOM*, 61(1). 2009. 17-22p.
- [58] MONTEIRO, S. N., LOURO, L. H., TRINDADE, W., ELIAS, C. N., FERREIRA, C. L., LIMA, E. D., LIMA JR., É. Natural Curua Fiber-Reinforced Composites in Multilayered Ballistic Armor. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46. 2015. 4567p.
- [59] MONTEIRO, S. N., MILANEZI, T. L., LOURO, L. H., JR., É. P., BRAGA, F. O., GOMES, A. V., & DRELICH, J. W. Novel ballistic ramie fabric composite competing with Kevlar fabric in multilayered armor. *Materials and Design*, 96. 2016. 263-269p.

- [60] MONTEIRO, S. N., PEREIRA, A. C., FERREIRA, C. L., JÚNIOR, É. P., WEBER, R. P., & ASSIS, F. S. Performance of Plain Woven Jute Fabric-Reinforced Polyester Matrix Composite in Multilayered Ballistic System. *Polymers*, 10(3). 2018. 230p.
- [61] MORYE, S.S.; HINE, P.J.; DUCKETT, R.A.; CARR, D.J.; WARD, I.M. Modelling of the Energy Absorption by Polymer Composites Upon Ballistic Impact. *Composites Science and Technology*, Vol. 60, p. 2631-2642. 2000.
- [62] MUÑOZ-VELEZ, M. F., HIDALGO-SALAZAR, M. A., & MINA-HERNANDEZ, J. H. Fibras De Fique Una Alternativa Para El Reforzamiento De Plásticos. *Influencia De La Modificación Superficial. Biotecnología En El Agropecuario Y Agroindustrial*, 12(2). p. 60-70 2014.
- [63] NASCIMENTO, L. F. Caracterização Do Compósito Epóxi-fibra De Malva Para Emprego Em Blindagem Balística Multicamada. Tese De Doutorado Em Ciência Dos Materiais. Instituto Militar De Engenharia, Rio De Janeiro. 2017.
- [64] NASCIMENTO, L. F., HOLANDA, L. I., LOURO, L. H., MONTEIRO, S. N., GOMES, A. V., & JR., É. P. Natural Mallow Fiber-Reinforced Epoxy Composite for Ballistic Armor Against Class III-A Ammunition. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48. 2017. 4425p.
- [65] NASCIMENTO, L. F., LOURO, L. H., MONTEIRO, S. N., GOMES, A. V., JÚNIOR, É. P., & MARÇAL, R. L. Ballistic Performance in Multilayer Armor with Epoxy Composite Reinforced with Malva Fibers. *Proceedings of the 3rd Pan American Materials Congress. The Minerals, Metals & Materials Society*. 2017. 331-338p.
- [66] NASCIMENTO, L. F., LOURO, L. H., MONTEIRO, S. N., GOMES, A. V., MARÇAL, R. L., LIMA JÚNIOR, É. P., & MARGEM, J. I. Ballistic Performance of Mallow and Jute Natural Fabrics Reinforced Epoxy Composites in Multilayered Armor. *Materials Research*, 20 (Suppl.2). 2017. 399-403p.
- [67] NASCIMENTO, L. F., MONTEIRO, S. N., LOURO, L. H., LUZ, F. S., SANTOS, J. L., BRAGA, F. D., & MARÇAL, R. L. Charpy impact test of epoxy composites reinforced with untreated and mercerized mallow fibers. *Journal of Materials Research and Technology*. 2018.
- [68] NETO, F. L.; PARDINI, L. C. *Compositos Estruturais: Ciencia e Tecnologia*. Ed. São Paulo: Edgar Blucher. 2006.
- [69] NIJ STANDARD - 0101.04. Ballistic Resistance of Law Enforcement and Corrections Standards and Testing Program U. S. Department of Justice. Office of Justice Programs. National Institute of Justice. 2000.
- [70] NIJ STANDARD-0101.06. Ballistic Resistance of Body Armor U.S. Department of Justice/Office of justice Programs. Washington: National Institute of Justice. 2008.
- [71] NUNES, L., PACIORNIK, S., & D'ALMEIDA, J. Evaluation Of The Damaged Area Of Glass-fiber Reinforced Epoxy-matrix Composite Materials Submitted To Ballistic Impacts. *Composites Science And Technology*, 64. 2004. 945-954p.

- [72] O'CONNOR, P. D., & KLEYNER, A. Practical Reliability Engineering. 5ª Ed. Chinchester: John Wiley & Sons. 2012.
- [73] ORREGO, J. F. Análise Comparativa De Eficiência E Competitividade Econômica Entre As Cadeias Produtivas Do Sisal (*Agave Sisalana*) No Brasil E Fique (*Furcraea Andina*) Na Colômbia. Universidade Federal Do Ceará , Fortaleza-CE. 2013.
- [74] OVALLE-SERRANO, S. A., BLANCO-TIRADO, C., & COMBARIZA, M. Y. Exploring the composition of raw and delignified Colombian fique fibers, tow and pulp. Cellulose, 25. 2018. 151p.
- [75] PEREIRA, A. C., MONTEIRO, S. N., ASSIS, F. S., & COLORADO, H. A. Izod Impact Tests in Polyester Matrix Composites Reinforced with Fique Fabric. The Minerals, Metals & Materials Serie. SPRINGER. 2017. 365-372p.
- [76] PEREIRA, A. C., MONTEIRO, S. N., ASSIS, F. S., MARGEM, F. M., LUZ, F. S., & BRAGA, F. D. Charpy impact tenacity of epoxy matrix composites reinforced with aligned jute fibers. Journal Materials Research and Technology, 6(4). 2017. 312-316p.
- [77] PEREIRA, A. C. Propriedades E Estrutura De Compósitos Poliméricos Reforçados Com Fibras E Tecidos De Fique. Dissertação De Mestrado Em Ciência Dos Materiais. Instituto Militar De Engenharia. Rio De Janeiro. 2017.
- [78] PEREIRA, A., MONTEIRO, S., ASSIS, F., & COLORADO, H. Charpy Toughness Behavior of Fique Fabric Reinforced Polyester Matrix Composites. The Minerals, Metals & Materials Series. SPRINGER. 2017. 3-9p.
- [79] PIRES, J. S. C., Fibras Naturais: Características químicas e potenciais aplicações. Monografia em Ciências Biológicas. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP). 2009.
- [80] RAVEN, P. H., EVERT, R. F., & EICHHORN, S. E. Biologia Vegetal. 5ª ed. Rio De Janeiro-RJ: Guanabara Koogan S.A. 2001.
- [81] ROCHA, J. G., & MULINARI, D. R. Caracterização mecânica dos compósitos de PEBD reforçados com fibras da palmeira. Cadernos UniFOA - Edição Especial do Curso de Mestrado Profissional em Materiais. 2014. 45-53p.
- [82] ROHEN, L. A., MARGEM, F. M., MONTEIRO, S. N., VIEIRA, C. M., ARAUJO, B. M., & LIMA, E. S. Ballistic Efficiency of an Individual Epoxy Composite Reinforced with Sisal Fibers in Multilayered Armor. Materials Research, 18 (Suppl 2). 2015. 55-62p.
- [83] SANTOS, J. L. Comportamento Balístico De Componente Cerâmico À Base De Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-LiF Em Blindagem Multicamada. Tese De Doutorado Em Ciência Dos Materiais. Instituto Militar De Engenharia, Rio De Janeiro. 2016.
- [84] SANTOS, J. L., MARÇAL, R. L., JESUS, P. R., GOMES, A. V., LIMA, E. P., ROCHA, D. N., LOURO, L. Mechanical properties and ballistic behavior of LiF-added Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-4wt%Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ceramics. Journal of Materials Research and Technology. 2018.
- [85] SATYANARAYANA, K. G., GUIMARÃES, J. L., & WYPYCH, F. Studies On Lignocellulosic Fibers Of Brazil. Part I: Source, Production,

- Morphology, Properties And Applications. Composites Part A: Applied Science And Manufacturing, 38. 2007. 1694-1709p.
- [86] SEGAL, L.; CREELY, J.; MARTIN JR., A. E; CONRAD, C. M. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. Textile Research Journal, Vol.29, p.p.786–794, 1959.
- [87] SERJOUEI, A.; CHI, R.; ZHANG, Z.; SRIDHAR, I. Experimental Validation of BLV Model on Bi-Layer Ceramic-Metal Armor. International Journal of Impact Engineering, Vol. 77, p. 30-41. 2015.
- [88] SILVA, M. D., STAINER, D., AL-QURESHI, H., & HOTZA, D. Blindagens Cerâmicas Para Aplicações Balísticas: Uma Revisão. Cerâmica. 2014. 323-331p.
- [89] TASDERMIRCI, A.; TUNUSOGLU, M.; GÜDEN, M. The Effect of the Interlayer on the Ballistic Performance of Ceramic/Composite Armors: Experimental and Numerical Study. International Journal of Impact Engineering, Vol. 44, p. 1-9. 2012.
- [90] TELES, M. C., ALTOÉ, G. R., NETTO, P. A., COLORADO, H., MARGEM, F. M., & MONTEIRO, S. N. Figue Fiber Tensile Elastic Modulus Dependence With Diameter Using The Weibull Statistical Analysis. Materials Research, 18 (Suppl 2). 2015. 193-199p.
- [91] TRINDADE, W. Influência Da Geometria E Da Microestrutura No Comportamento Dinâmico Da Alumina Aditivada Com Nióbia. Tese De Doutorado Em Ciência Dos Materiais. Instituto Militar De Engenharia, Rio De Janeiro. 2012.
- [92] ULVEN, C., VAIDYA, U., & HOSUR, M. Effect Of Projectile Shape During Ballistic Perforation Of Vartm Carbon/Epoxy Composite Panels. Composite Structures, 61. 2003. 143-150p.
- [93] VIEIRA, L. M. Efeito do Tratamento Químico e da Adição de Nano Silica em Compósitos Híbridos de Sisal. Dissertação de Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação. Universidade Federal de São João Del-rei, São João Del-Rei. 2013.
- [94] WANG, L., KANESALINGAM, S., NAYAK, R., & PADHYE, R. Recent Trends In Ballistic Protection. Textiles And Light Industrial Science And Technology, 3. 2014. 37-47p.
- [95] ZAH, R., HISCHIER, R., LEÃO, A. L., & BRAUN, I. Curaua Fibers In The Automobile Industry - A Sustainability Assessment. Journal Of Cleaner Production. 2007. 1032-1040p.