

# AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE BLINDAGEM MULTICAMADA COM COMPÓSITO DE EPÓXI REFORÇADO COM TECIDO DE BURITI\*

*Luana Cristyne da Cruz Demosthenes<sup>1</sup>*

*Lucio Fabio Cassiano Nascimento<sup>2</sup>*

*Michelle Souza Oliveira<sup>3</sup>*

*Fabio da Costa Garcia Filho<sup>4</sup>*

*Sérgio Neves Monteiro<sup>5</sup>*

*Fernanda Santos da Luz<sup>6</sup>*

## Resumo

Os números crescentes da violência e dos conflitos armados tornam necessários sistemas de proteção eficientes e uma das soluções que tem apresentado resultados vantajosos é o sistema de blindagem multicamadas (SBMs). Os SBMs utilizam materiais mais leves e com baixo custo. Este tipo de blindagem normalmente é composto por três camadas. A primeira consiste em um material cerâmico, que tem a função de fragmentar a ponta do projétil e absorver a maior parte da energia do impacto balístico. A segunda pode ser composta por um compósito de matriz epóxi reforçado com fibras sintéticas ou naturais, com o objetivo de absorver a nuvem de fragmentos oriunda da fragmentação da camada cerâmica e, ainda, absorver mais uma parcela de energia. Uma terceira camada que consiste em um chapa de liga de alumínio pode ser adicionada, com a função de absorver a energia residual do impacto balístico através de deformação plástica. O objetivo desta pesquisa foi analisar o comportamento balístico do compósito de matriz epóxi reforçado com tecido de buriti nos teores de 10, 20 e 30% em volume. Os ensaios balísticos foram realizados com munição de calibre 7,62x51 mm M1 seguindo critérios da norma NIJ 0101.04. Os dados foram tratados estatisticamente pelo método de Weibull e tais valores foram positivos, pois atenderam ao valor regido pela NIJ, além de reter todos os fragmentos provenientes da interação do projétil com a cerâmica, independentemente da porcentagem do reforço.

**Palavras-chave:** Compósitos; Fibras Naturais, Tecido de Buriti, Ensaio balísticos

## BEHAVIOR EVALUATION OF BALLISTIC MULTILAYER ARMOR WITH EPOXY COMPOSITE REINFORCED WITH BURITI FABRIC

### Abstract

Increasing numbers of violence and armed conflict make efficient protection systems necessary, and one of the solutions that has yielded advantageous results is the multilayer shielding system (SBMs). SBMs use lighter, cheaper materials. This type of shield consists of three stratum, the first consists of a ceramic material, which has the function of fragmenting the tip of the projectile and absorb most of the energy of the ballistic impact. The second can be composed of an epoxy matrix composite reinforced with natural fibers, in order to absorb the cloud of fragments from the fragmentation of the ceramic layer and also to absorb another portion of energy. A third layer consisting of an aluminum alloy sheet may be added, with the function of absorbing the residual energy of the ballistic impact through plastic deformation. The objective of this research was to analyze the behavior of the composite of epoxy matrix reinforced with buriti tissue in the contents of 10, 20 and 30% by volume. Ballistic tests were carried out with 7.62x51 mm M1 caliber, following the criterion of

NIJ 0101.04. The data were treated statistically by the Weibull method and these values were positive, since they met the value governed by NIJ and retained all fragments from the interaction of the projectile with the ceramic, regardless of the percentage of reinforcement.

**Keywords:** Composites; Natural Fibers; Buriti Fabric; Ballistic Test.

<sup>1</sup> *Engenheira Civil, Bacharel, Mestranda em Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. eng.luanademosthenes@gmail.com*

<sup>2</sup> *Engenheiro Metalurgista, D.C, Professor Titular, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>3</sup> *Engenheira Civil, Mestrando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*

<sup>4</sup> *Engenheiro de Materiais, Mestrando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*

<sup>5</sup> *Engenheiro Metalurgista, Ph.D, Professor Titular, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>6</sup> *Engenheira de Materiais, Doutora em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*

## 1. INTRODUÇÃO

A violência e os conflitos armados têm aumentado drasticamente nos últimos anos e, tanto para civis quanto para militares, isso requer uma proteção adequada que seja capaz de reter munições desde calibres com baixa velocidade de impacto até os de alta velocidade [1,2]. Dados estatísticos apontam que, apenas em 3 meses no ano de 2018, só no Estado do Rio de Janeiro, 30 policiais foram mortos, nas mais diversas situações de conflito [3].

O aumento da violência impulsiona os pesquisadores a criarem materiais que resistam aos mais diversos artefatos e ameaças [4, 1]. Dentre tais materiais, destaca-se o Sistema de Blindagem Multicamadas (SBMs), que são materiais compostos por três camadas distintas que apresentam características específicas para resistir ao impacto de munição de fuzil 7,62 mm. A primeira camada é um material duro e frágil que tem o intuito de absorver energia e fragmentar o projétil [1,2,4,5]. Como segunda camada é utilizado um material com densidade menor que o cerâmico e que têm o intuito de absorver uma parcela significativa da energia cinética produzida pelos estilhaços, tanto do cerâmico quanto do projétil [5]. A terceira camada é composta por uma chapa de alumínio que possui característica dúctil, com capacidade de deformar plasticamente e reter possíveis fragmentos, remanescentes do projétil e camadas anteriores [2].

Um possível material para ser empregado como camada intermediária do SBMs é formado por compósitos poliméricos reforçados com Fibras Naturais Lignocelulósicas (FNLs). Tais fibras naturais apresentam algumas vantagens quando comparadas as fibras sintéticas como menor peso específico, baixa toxicidade, biodegradabilidade, baixo custo, além da possibilidade de favorecimento de regiões economicamente menos desenvolvidas, como a região norte e nordeste do Brasil [6,1,2,5]. Outra importante motivação consiste na geração de empregos no setor rural, visto que o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de fibras naturais [7], fato que naturalmente refletirá positivamente no Produto Interno Bruto (PIB).

A FNLs analisada na presente pesquisa foi fibra de Buriti (“Mauritia Flexuosa”). A fibra é oriunda de uma palmeira tipicamente de terras alagáveis da floresta Amazônica e cerrado (Figura 1.a), podem ser extraídas das folhas (linho) ou do pecíolo (Figura 1.b). As utilizadas nessa pesquisa são oriundas do linho e consistem num tecido com trama simples (Figura 1.c). As fibras de Buriti têm densidade na faixa de 0,63 a 1,12 g/cm<sup>3</sup> [6]. Sua composição de celulose é de aproximadamente 51,29% e a de lignina, 16,37% [8]. Apresenta propriedades mecânicas como resistência a tração de 492,74 MPa para fibras com diâmetros no intervalo de 0,4 a 0,8 mm e módulo de elasticidade de 24,87 GPa [6,9].



**Figura 1.** Buriti (a) palmeira, (b) detalhe das possibilidades de extração da fibra e (c) tecido de buriti com trama simples.

Apresente pesquisa realizou a aplicação do tecido de buriti em compósitos de matriz epoxídica dentro de SBMs. As frações de reforço do tecido foram de 10, 20 e 30% em volume. A avaliação da eficiência balística destes SBMs foi realizada através da medição da indentação na plastilina, após impacto de munição 7,62 mm, objetivando a aplicação em coletes para proteção individual e verificando o atendimento aos parâmetros estipulados pela NIJ 0101.04.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### Cerâmica

A cerâmica balística foi produzida com alumina (96%p  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) fornecida pela empresa Treibacher Schleifmittel e dopada com nióbia (4%p  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) fornecida pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), bem como foi considerada uma adição de 0,5%p de fluoreto de Lítio (LiF), fornecido pela empresa Dinâmica Química Contemporânea [10].

### Tecido de Buriti

Os tecidos de buriti foram adquiridos no Mercado Municipal Adolpho Lisboa, situado no centro de Manaus. Os tecidos foram confeccionados manualmente, com trama simples, por comunidades indígenas do interior do Amazonas. Os tecidos foram cortados nas dimensões de 12 x 15 cm e colocados na estufa a 60°C por 24h para retirar a umidade no tecido para melhorar a adesão entre a resina epóxi e a fibra.

### Preparo dos compósitos

Os compósitos epóxi-tecido de buriti foram preparados nos teores indicados na Tabela 1e com o auxílio de um molde metálico (Figura 2), de dimensões 12 x 15 x 1,19 cm<sup>3</sup>. Uma fina camada de graxa de silicone foi aplicada com o intuito de atuar como desmoldante, facilitando a remoção dos corpos após a prensagem. Foi aplicado uma carga de 5 toneladas durante 24h para confecção dos corpos de prova.

**Tabela 1.** Nomenclatura adotada para as condições analisadas

Nomenclatura	Condições Analisadas
<b>CETB10</b>	Compósito Epóxi reforçado com 10% em volume de tecido de buriti
<b>CETB20</b>	Compósito Epóxi reforçado com 20% em volume de tecido de buriti
<b>CETB30</b>	Compósito Epóxi reforçado com 30% em volume de tecido de buriti

\*cada teor contou com 6 amostras.



**Figura 2.** Conjunto que compõe a matriz metálica (a) chapa interna inferior, (b) camisa, e (c) punção superior.

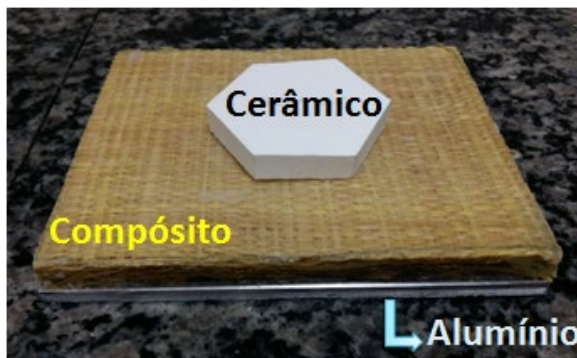
Os tecidos foram colocados manualmente na matriz e molhados com a resina epóxi. Para garantir a eficiente molhabilidade das fibras considerou-se um excesso de 30%p nos cálculos da mistura epóxi-endurecedor.

#### Placas de liga de alumínio (Al 5052 H34)

As placas de liga de alumínio 5052 H34 utilizadas foram fornecidas pela empresa Metalak Comércio Indústria Metais, nas dimensões 120 x 150 mm, com espessura de 5mm.

#### Montagem da blindagem multicamadas

Os corpos para blindagem multicamada foram montados com o corpo cerâmico como camada frontal, seguido pelo compósito epóxi-tecido de buriti e, por fim, pela placa de alumínio 5052 H34. Na Figura 3 é mostrado o SBM montado com os componentes supracitados. Para unificar os componentes foi utilizada uma fina camada do adesivo de cura rápida, da marca Golden Glass, a base de poliuretano.



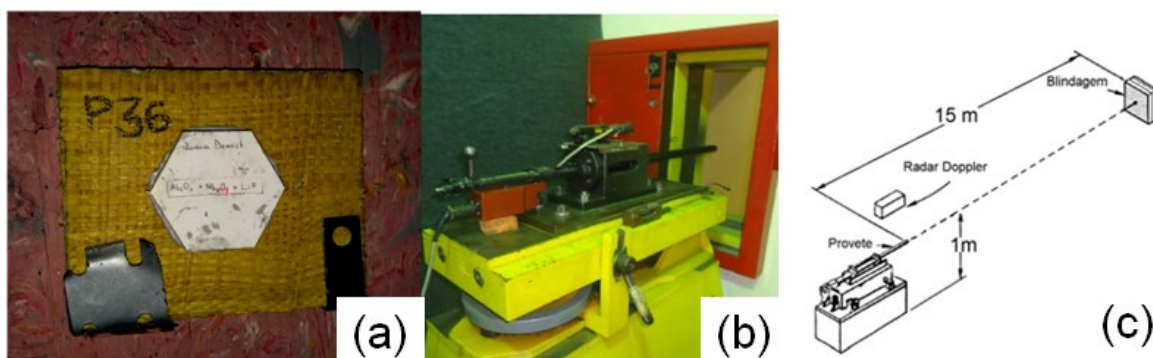
**Figura 3.** Sistema de blindagem multicamada a ser ensaiado.

### Ensaio balísticos

Os ensaios balísticos tiveram como objetivo medir a indentação provocada na plastilina após o impacto do projétil. Conforme a NIJ 0101.04 [11] essa indentação deve ser inferior ou igual a 44 mm para ser considerada eficiente e evitar danos letais ao ser humano.

Os testes balísticos foram realizados nas seguintes condições:

- I. Munição: Calibre 7,62 mm M1, com massa de 9,7 gramas;
- II. Dispositivo: Provette calibre 7,62 mm (Figura 4.b) e um dispositivo de fixação do alvo;
- III. Distância do alvo: 15 metros, conforme previsto na norma ABNT NBR 15000 para as munições 7,62 mm (Figura 4.c);
- IV. A incidência no alvo foi de um ângulo de 90°;
- V. Local: Centro de Avaliações do Exército (CAEx).



**Figura 4.** (a) Sistema de blindagem multicamada fixado na plastilina; (b) Provete calibre 7,62 mm com mira laser; e (c) Esquema do sistema utilizado no ensaio.

### Método estatístico de Weibull

Os dados foram tratados estatisticamente pelo método de Weibull. Utilizou-se este método para verificar o desempenho balístico, através da profundidade da indentação na plastilina, para cada tipo de compósito, considerado como camada intermediária no SBM. Os parâmetros são aplicados na Equação 1.

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

Aplicando o logaritmo na Equação 1, tem-se a seguinte Equação 2:

$$\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1-F(x)} \right) \right] = \beta \ln(x) - [\beta \ln(\theta)] \quad (2)$$

Onde:  $x$  = indentação provocada na plastilina;  $\beta$  = módulo de Weibull;  $\theta$  = indentação característica.

E comparando a Equação 2 com a equação da reta ( $y = a \cdot x + b$ ) tem-se que o “ $y$ ” é dado por  $\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1-F(x)} \right) \right]$ , “ $x$ ” é igual a  $\ln(x)$ , “ $a$ ” é equivalente a  $\beta$  (módulo de Weibull), ou seja, é igual ao coeficiente angular da reta e “ $b$ ” dado por  $-[\beta \ln(\theta)]$  [2].

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um dos principais parâmetros considerados para medir a eficiência de um material balístico é a sua integridade após o impacto. Neste caso a cerâmica fragmentou-se por inteiro devido a sua característica frágil, de modo que esse mecanismo de deformação auxilia na maior parte da absorção de energia do projétil [2]. Por sua vez, o compósito teve a função de dissipar energia, além de capturar os fragmentos tanto do projétil quanto da cerâmica.

Para todas as condições analisadas não houve a perfuração do SBM. Conforme representado na Figura 5, a placa de CETB30 resultou na melhor integridade física, após o ensaio balístico, porém

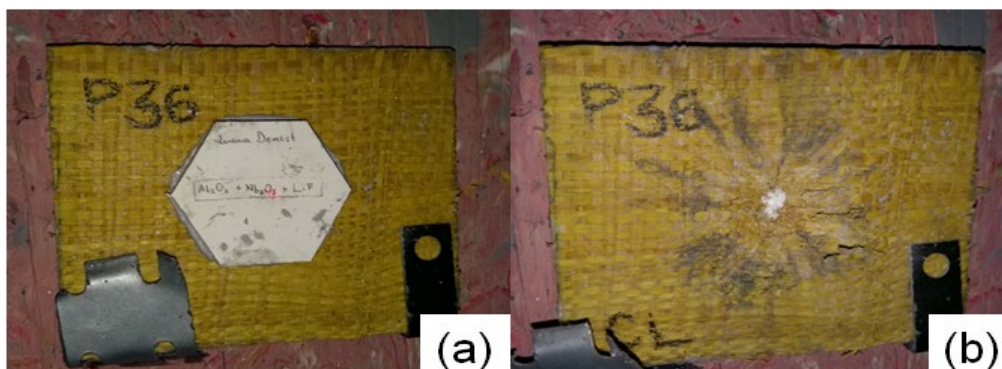


Figura 5. SBM fixado na plastilina (a) compósito antes do disparo e (b) compósito após o disparo.

Para cada amostra foram obtidas 10 medidas de profundidade de indentação e foi considerada a média desses valores como um único ponto na análise de Weibull. Os dados foram organizados em ordem crescente. Desta forma, os pontos identificados no gráfico correspondem as 6 amostras.

Os dados obtidos após o ensaio foi montada a Tabela 2, que apresenta para cada teor de reforço: a indentação média, o desvio padrão e os parâmetros de Weibull, respectivamente.

Tabela 2. Condições analisadas e suas indentações médias, desvio padrões e os parâmetros de Weibull

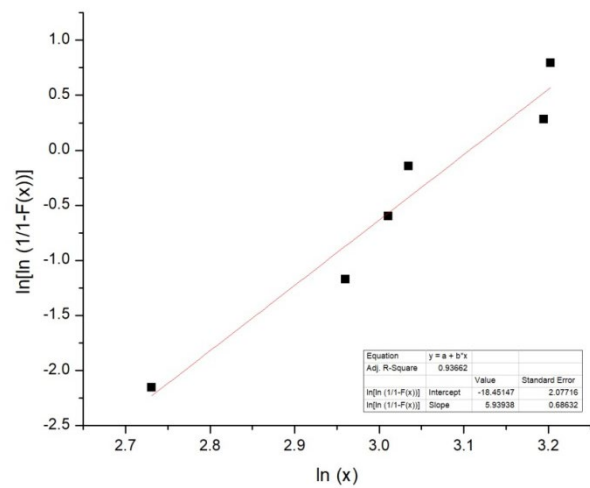
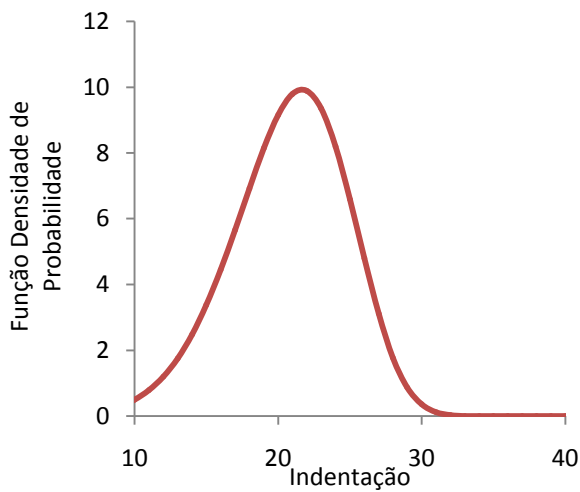
Material	Indentação Média	Desvio Padrão	$\theta$	$\beta$	$R^2$
CETB10	20,6	3,45	22,34	5,93	0,949
CETB20	22,1	5,36	26,42	4,57	0,766
CETB30	25,5	7,88	29,3	3,24	0,901

Dentre os parâmetros de Weibull, destaca-se que o parâmetro  $\theta$  representa a profundidade da indentação mais característica, que é diferente da simples média aritmética. O parâmetro de ajuste  $R^2$  é o dado que indica o grau de precisão da análise estatística.

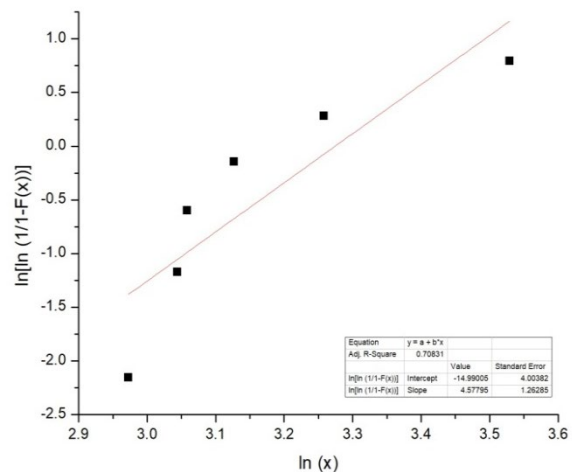
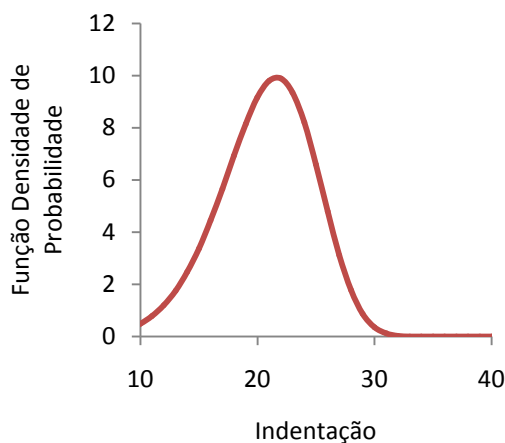
Sobreleva-se que o método estatístico de Weibull impõe limitações sobre os valores paramétricos, ou seja, o valor do módulo de Weibull,  $\beta$ , deve variar entre 0,5 e 15. Portanto, quanto maior o valor de  $\beta$ , maior confiabilidade dos resultados [2].

A menor indentação obtida foi para o CETB10. Porém, é importante destacar que apesar deste valor ter sido inferior, a placa foi fragmentada em diversas partes, tornando-se inviável a sua aplicação em SBMs, em comparação as demais frações utilizadas.

A figura 6 apresenta os gráficos de Weibull, obtidos através da Equação 2, e relacionado a eles as curvas de função de densidade de probabilidade para a profundidade de indentação. A relação linear é mostrada na Figura 6, demonstrando sua característica unimodal.

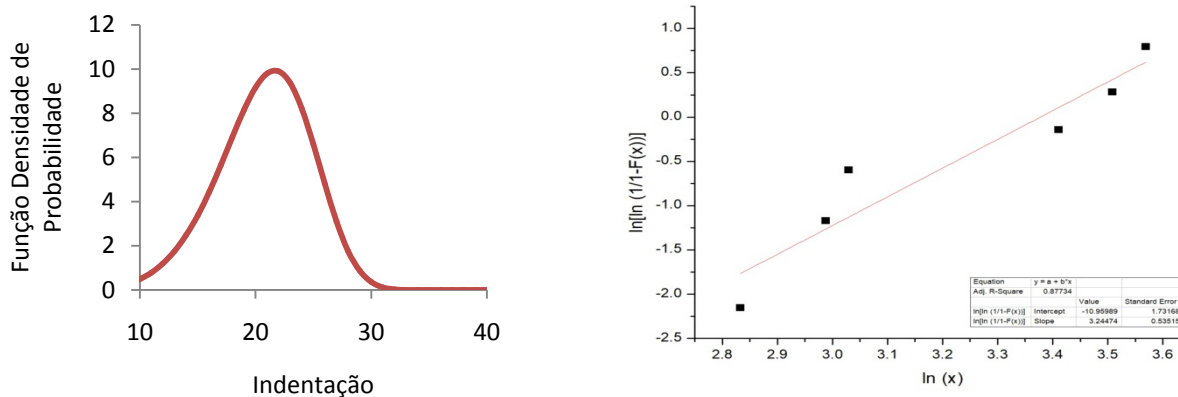


(a)



(b)





(c)

**Figura 6.** Gráficos de distribuição Weibull e de densidade de probabilidade para (a) CETB10; (b) CETB20 e (c) CETB30.

O CETB20 foi o que obteve menor precisão,  $R^2$  com 0,76, como pode-se observar na Figura 6.b e Tabela 2. Portanto, para corrigir este dado estamos realizando outras amostras e realizaremos outros ensaios. Haja vista que, uma possível explicação para tal dado é, como o trabalho utiliza fibras naturais é possível que algum erro como bolhas de ar aprisionado internamente na placa agindo como concentrador de tensão [2].

#### 4. CONCLUSÃO

Os três tipos de materiais testados como camada intermediária na blindagem multicamada se mostraram eficientes, pois atenderam a norma internacional NIJ 0101.04, isto é, a profundidade de indentação foi inferior a 44 mm.

O compósito CETB10 apresentou a menor indentação em comparação aos outros compósitos testados. Contudo, a integridade da placa se mostrou inadequada para a utilização em SBM. Portanto, esse teor torna-se inviável para utilização de blindagem, pois não é capaz de receber outros disparos.

O compósito CETB30 apesar de manter sua integridade após o disparo foi o que apresentou a maior indentação na plastilina.

O compósito CETB20 demonstrou o melhor comportamento quanto a integridade da placa e quanto ao estilhaçamento. Portanto, dentre os três teores de reforço analisado, este é o que possui melhor desempenho balístico como camada intermediária.

Por fim, considera-se que esta FNLS possui propriedades aceitáveis para compor um SBM. Além de ser um material ambientalmente correto, poderia ser fator de aumento de empregos e renda em regiões rurais menos favorecidas do país, em função da possível aplicação de engenharia, o que aumentaria consideravelmente o seu valor de mercado.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro oriundos das agências brasileiras: CNPq, FAPERJ e CAPES; e ao CAEx pela execução dos ensaios balísticos.

## REFERÊNCIAS

- 1 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.
- 2 Luz FS, Lima Jr. EP, Louro LHL, Monteiro SN. Ballistic test of multilayered armor with intermediate epoxy composite reinforced with jute fabric. *Mater Res*, v.18, 2015, p.170–177.
- 3 Reportagem *Jornal Nacional*, Rio tem 30 PMs mortos em 3 meses; cabo morre baleado na Pavuna. G1 2018. [acesso em 7 jun. 2018] 22:45. Disponível em: <http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2018/03/rio-tem-30-pms-mortos-em-3-meses-cabo-morre-baleado-na-pavuna.html>
- 4 Medvedovski E. Ballistic Performance of Armour Ceramics: Influence of Design and Structure - Part 1. *Ceramics International*, v.36, 2010, p.2103-2115.
- 5 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
- 6 Monteiro SN, Lopes FPD, Barbosa AP, Bevitori AB, Silva ILA, Costa LL. Natural lignocellulosic fibers as engineering materials – an overview. *Metall Mater Trans. A*, v.42 (a), 2011, p.2963–2974.
- 7 Satyanarayana KG, Guimarães JL, Wypych F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites: Part A*, v. 38, p. 1694-1709, 2007.
- 8 Barbosa, AP. Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de Buriti. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2011.
- 9 Santos, NSS. Análise experimental e teórica do comportamento mecânico sob carregamentos quase-estáticos de compósitos reforçados com fibras vegetais. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2010.
- 10 Santos JL, Marçal RLSB, Jesus PRR, Gomes AV, Lima Jr. EP, Monteiro SN, De Campos JB, Louro LHL. Effect of LiF as Sintering Agent on the Densification and Phase Formation in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-4 Wt Pct Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Ceramic Compound. *Metall Mater Trans. A*, v. 48, p. 4432–4440, 2017.
- 11 NIJ Standard 0101.04. Ballistic Resistance of Personal Body Armor. U.S. Department of Justice/Office of Justice Programs. National Institute of Justice, 2000.