

# EFICIÊNCIA BALÍSTICA DE SISTEMAS DE BLINDAGEM MULTICAMADA COM COMPÓSITOS DE EPÓXI REFORÇADOS COM TECIDO DE FIQUE\*

Michelle Souza Oliveira<sup>1</sup>  
Fábio Da Costa Garcia Filho<sup>2</sup>  
Luana Cristyne Da Cruz Demosthenes<sup>3</sup>  
Fábio Oliveira Braga<sup>4</sup>  
Artur Camposo Pereira<sup>5</sup>  
Sergio Neves Monteiro<sup>6</sup>

## Resumo

Este trabalho visa apresentar os resultados obtidos por meio de ensaios balísticos realizados em novos sistemas de blindagens multicamadas (SBM), na qual as camadas comumente utilizadas de tecido de aramida foram substituídas por uma camada de igual espessura de compósitos epóxicos distintos reforçados com tecido de fibra de fique. A blindagem multicamada utilizada foi ensaiada com munição 7,62 mm M1, com alta velocidade de impacto, para avaliação do comportamento balístico de SBMs que possuem uma pastilha cerâmica  $[(Al_2O_3 + 4\%p Nb_2O_5) + 0,5\%p LiF]$  como camada frontal, liga de alumínio 5052 H34 como camada posterior, e diferentes compósitos como camada intermediária. Compósitos de matriz epóxi reforçados com 15, 30, 40 e 50% de tecido de fique, com arranjo simples, foram testados como parte integrante dos SBMs. A indentação na plastilina, com penetração do projétil inferior a 44 mm no material de referência, atestou a eficácia dos compósitos como um componente da blindagem devido ao cumprimento da condição estabelecida pela norma americana NIJ 0101.06. De todas as composições testadas, considerou-se o compósito com 50% de tecido de fique o de melhor desempenho balístico. Os resultados revelaram também que o tecido de aramida convencional apresenta indentação semelhante ao compósito epóxi-tecido de fique. Deste modo, considera-se o compósito com de tecido de fique como potencial substituto para a aramida em SBMs na blindagem balística para proteção individual, com a vantagem de utilizar um material renovável, de baixo custo e ambientalmente correta.

**Palavras-chave:** Blindagem balística; Sistema multicamada; Tecido de fique; Compósito.

## BALLISTIC EFFICIENCY OF MULTILAYERED ARMOR SYSTEM WITH EPOXY COMPOSITES REINFORCED WITH FIQUE FABRIC

### Abstract

This work aims to present the results obtained through ballistic tests performed in new multilayered armor systems (MAS), in which the commonly used layers of aramid fabric were replaced by a layer of equal thickness of different epoxy composites reinforced with fique fabric. The multilayered armor used was tested with 7.62 mm M1 ammunition with high impact velocity to evaluate the ballistic behavior of MAS that have a ceramic tile  $(Al_2O_3 + 4\% p Nb_2O_5) + 0.5\% p LiF]$  as a layer frontal, aluminum alloy 5052 H34 as backsheet, and different composites as an intermediate layer. Epoxy matrix composites reinforced with 15, 30, 40 and 50% of plain fique fabric were tested as an integral part of the MAS. Indentation in a clay witness, with projectile penetration of less than 44 mm in the reference material, attested the effectiveness of the composites as a component of the armor due to compliance with

the condition established by the American standard NIJ 0101.06. Of all the compositions tested, the composite with 50% of tissue of better ballistic performance was considered. The results also revealed that conventional aramid fabric exhibits similar indentation to the epoxy-fique fabric. In this way, the composite with fique fabric is considered as a substitute for aramid in MAS in ballistic armor for individual protection, with the advantage of using a renewable, low cost and environmentally correct material.

**Keywords:** Ballistic armor; Multilayered system; Fique fabric; Composite.

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

## 1 INTRODUÇÃO

Muitos conflitos recentes envolvem espaço geopolítico valioso, aumento de rivalidade 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. Atualmente são utilizadas blindagens de um único material e blindagens multicamadas, a aplicação depende do poder da munição. Um sistema de blindagem multicamadas (SBM) fornece proteção contra projéteis de alta velocidade de impacto, como o calibre 7,62 mm [1].

Sistema de blindagem de componente único baseado em aço, compósito ou outros sistemas não são muito eficazes para resistir à penetração do projétil [2]. As blindagens mais eficazes são as que combinam camadas de materiais diferentes para promover proteção adequada contra várias ameaças, sem prejudicar a mobilidade da estrutura, de modo a possuir densidade similar ou inferior às obtidas por uma única camada [3].

Em um SBM típico a camada frontal consiste em uma cerâmica dura quebradiça com alta resistência a compressão, que possui a função de absorver a maior parte de energia cinética do projétil. A camada subsequente é geralmente formada por um material mais leve, com a finalidade de absorver parte da energia cinética produzida pelos estilhaços de cerâmica e do projétil [4]. Sendo os compósitos de fibra os materiais reconhecidos por fornecer a melhor combinação de desempenho e peso [2].

Neste contexto, a fibra de fique surge como excelente reforço em compósitos termofixos [5]. No SBM pode ser adicionada também uma terceira camada de um metal dúctil, que tem função de restringir a penetração do projétil e dos fragmentos das demais camadas por meio do mecanismo de deformação plástica [3].

Em um teste balístico (Figura 1), o SBM é definido como um alvo em um bloco chamado de plastilina. Este bloco simula um corpo humano sendo protegido pelo SBM, e deve permitir somente a penetração dos fragmentos carregados pela onda de choque de impacto até um limite padrão de 1,73 polegada (44 mm) [6].

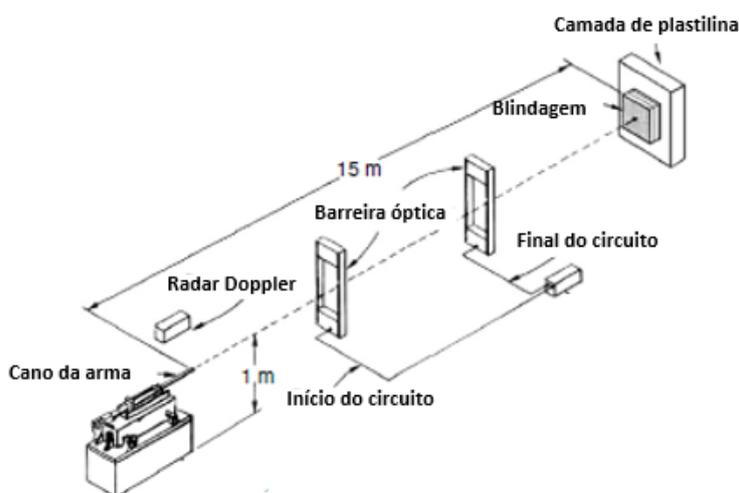


Figura 1. Esquema do sistema utilizado para os ensaios balísticos

Além dessa profundidade de indentação na plastilina, o teste balístico indica um trauma letal ao combatente. No presente trabalho, o desempenho balístico de SBM utilizando como segunda camada compósitos de epóxi reforçados com 15, 30, 40 e 50% vol. de tecido de fique com arranjo simples foi estudado. Os desempenhos dos sistemas considerados foram comparados com o do tecido de aramida (Kevlar™).

## 2 DESENVOLVIMENTO

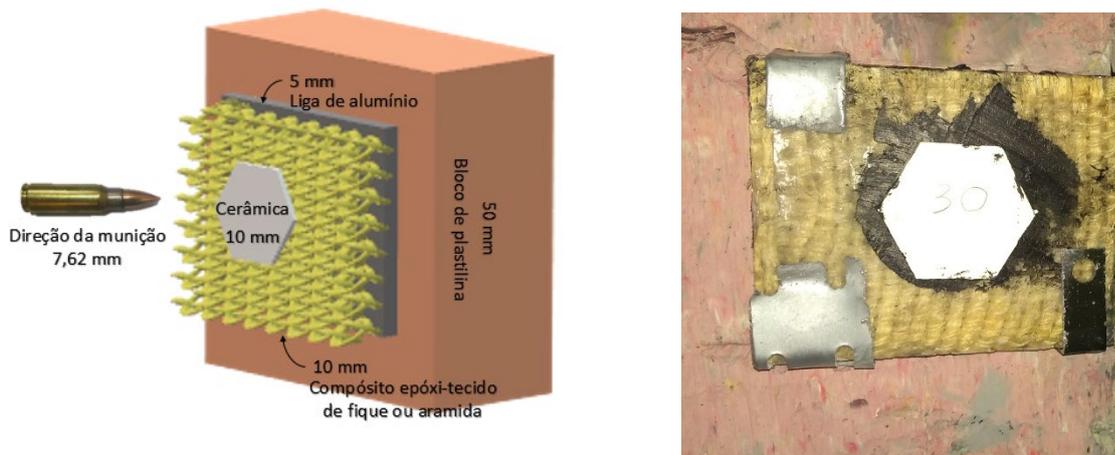
A fabricação do SBM foi dividida em três etapas: (1) a fabricação da pastilha cerâmica, (2) preparação do compósito epóxi-tecido de fique e (3) montagem da blindagem. Uma folha de liga de alumínio 5052-H34 com 120x150mm de dimensões laterais e 5 mm de espessura, utilizada como terceiro componente do SBM, foi fornecida pela empresa Metalak.

Para a preparação do material cerâmico hexagonal com dimensões laterais de 31 mm e 10 mm de espessura foi utilizada alumina  $Al_2O_3$  (94,53%p), fornecido pela TreibacherSchleifmittle, dopada com  $Nb_2O_5$  (3,94%p) fornecido pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM). Tanto o LiF (0,5%) quanto o polietilenoglicol (PEG-1,53%p), como ligante, foram adquiridos da Vetec [7]. Em seguida foi adicionado água à mistura. Essa mistura fluída foi moída em um moinho de bolas modelo MA500 Marconi.

Diferentes tamanhos de bolas de alumina foram usados como elementos de moagem durante 8 horas de procedimento de homogeneização e trituração. Após este processo, o material foi deixado por 24 horas na estufa a 100°C para secagem, em seguida foi desaglomerada num almofariz e pistilo de cerâmica seguido de peneiramento para a obtenção do pó. O material foi então prensado sob uma pressão de 60MPa, deste modo foram obtidos os corpos verdes os quais foram então sinterizados a 1400°C por 3 horas.

A confecção da placa de compósito, de dimensões 12 x 15 x 1 cm, de matriz de epóxi reforçados com tecido de fique consistiu na prensagem em um molde metálico sob carga de 5 toneladas, pelo período de 24 horas. As proporções adotadas foram de 15, 30, 40 e 50% em volume de tecido onde estes foram cortados nas dimensões do molde, compondo de 1 a 4 camadas associadas as frações volumétricas. Para a preparação da resina epóxi em estado líquido foi adicionado, na proporção de 13% em peso, o endurecedor trietileno tetramina (TETA).

A preparação dos SBMs foi realizada por meio da colagem das camadas do alumínio, do compósito e da cerâmica, utilizando um adesivo de cura rápida GOLDEN GLASS, que não interfere nos testes. Na Figura 2 é mostrado o esquema de uma blindagem multicamada com as espessuras dos componentes e o corpo de prova final obtido.



**Figura 2.** Representação esquemática da blindagem multicamada investigada colocada à frente da plastilina e o corpo de prova final.

O ensaio balístico tem por finalidade verificar a capacidade de um material ou equipamento absorver a energia cinética de um projétil de alta velocidade. Para isto, foram realizados ensaios para a avaliação do nível da proteção balística alcançada pelo SBM. No ensaio de deformação na plastilina, a blindagem multicamada foi posicionada em frente a um bloco de plastilina (CORFIX®) com 50 mm de espessura e densidade de  $1,7 \text{ g/cm}^3$ .

Neste trabalho, após cada teste, o recuo produzido na plastilina foi medido com um sensor laser modelo Q4X Banner, mostrado na Figura 3. Um mínimo de 10 medições foi feito nas indentações.



**Figura 3.** Medição da indentação com sensor laser.

A profundidade do valor de indentação, que serve como indicação do desempenho balístico, foi analisada usando a estatística de Weibull por meio da função de distribuição cumulativa.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

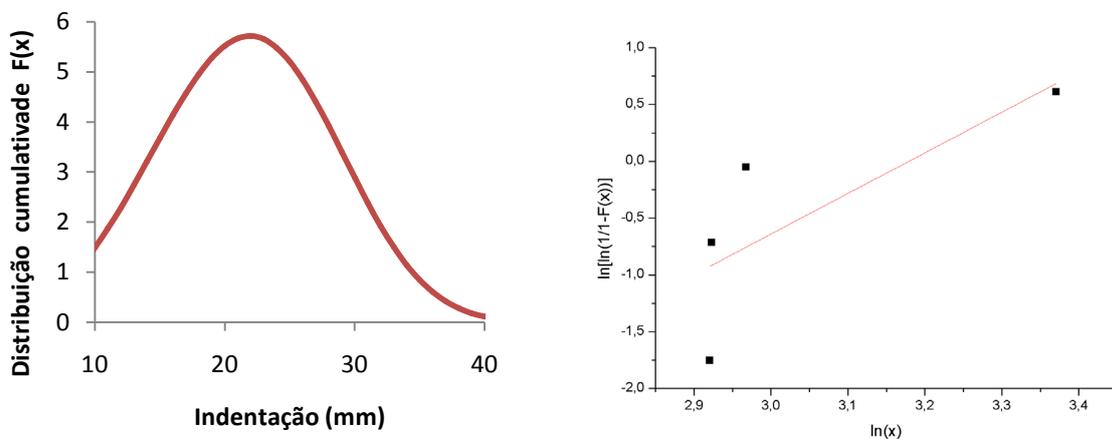
Em todos os testes balísticos, o projétil de 7,62 mm não perfurou o alvo do SBM, ou seja, sempre foi interrompido deixando uma indentação na plastilina. A Figura 4 mostra o aspecto de um SBM antes e após o impacto. Deve ser observado que a pastilha cerâmica hexagonal foi totalmente desintegrada, deixando sua sombra cinza impressa na placa de apoio. A nuvem de fragmentos cerâmicos foi capturada pela

placa do compósito de epóxi e tecido de fique, mas a segunda camada permaneceu parcialmente intacta (Figura 4b).

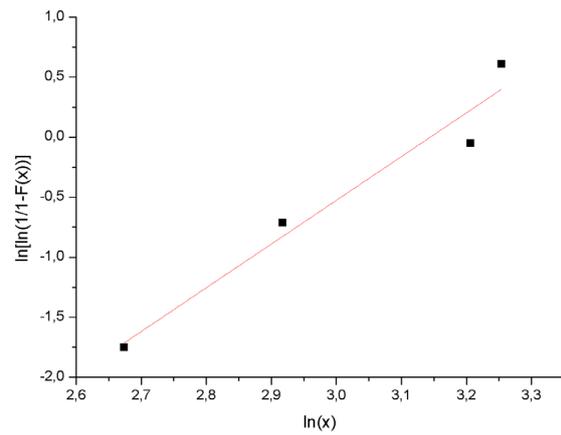
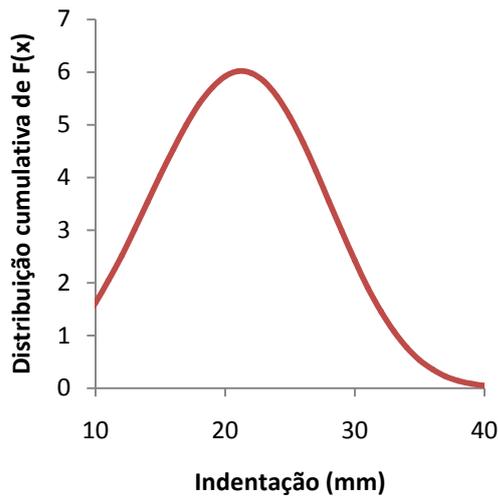


**Figura 4.** Sistema de blindagem multicamada (a) antes e (b) após o ensaio balístico.

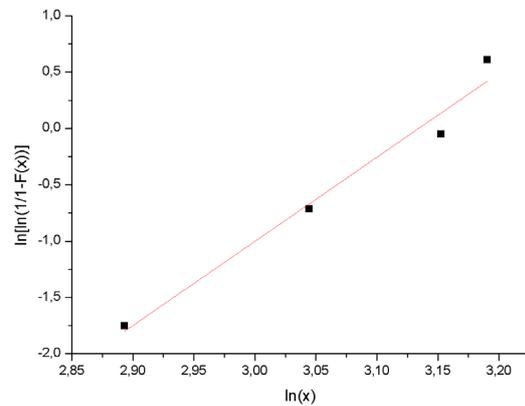
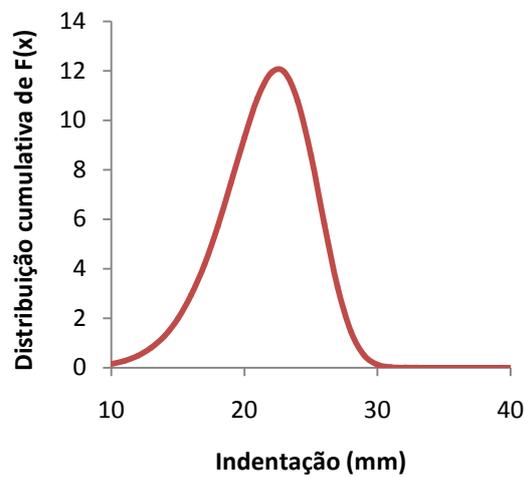
Os valores de indentação obtidos através do ensaio de deformação na plastilina foram tratados pela Estatística de Weibull, gerando os gráficos e as curvas de distribuição de probabilidade. Uma correlação linear para os pontos de dados também é mostrada nessas figuras, refletindo sua característica unimodal.



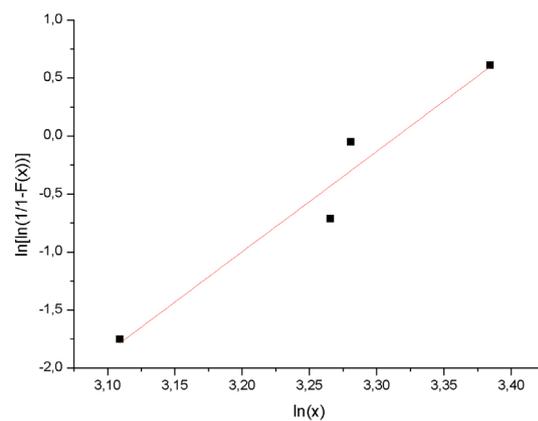
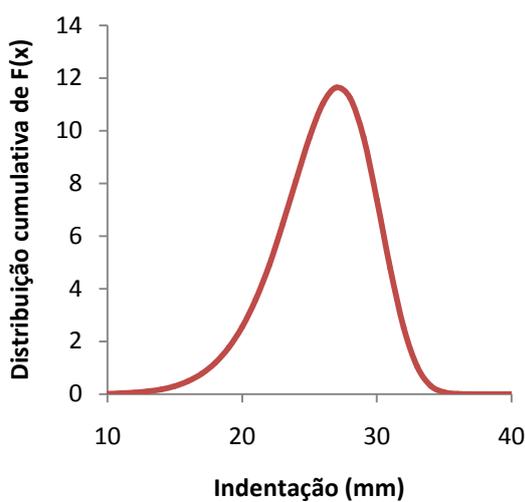
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 5.** Gráficos de Weibull e curvas de distribuição de probabilidade para as profundidades de indentação na plastilina tento como alvos os SBMs com segunda camada de (a) E-15%TF, (b)E-30%TF, (c) E-40%TF e (d) E-50%TF.

A Tabela 1 resume os valores médios da profundidade de indentação, juntamente com o módulo de Weibull ( $\beta$ ), a unidade característica ( $\theta$ ) e o parâmetro de precisão ( $R^2$ ).

**Tabela 1.** Parâmetros de Weibull, média e desvio padrão da indentação para as frações de 15, 30, 40 e 50% de tecido de fIQUE

Material de segunda camada	Trauma (mm)	Análise de Weibull		
		$\beta$	$\theta$	$R^2$
Epóxi reforçado com 15%vol. Tecido de FIQUE	19,0±5,1	3,57	24,03	0,60
Epóxi reforçado com 30%vol. Tecido de FIQUE	21,6±5,4	3,64	23,21	0,96
Epóxi reforçado com 40%vol. Tecido de FIQUE	22,2±2,8	7,47	22,97	0,98
Epóxi reforçado com 50%vol. Tecido de FIQUE	26,4±2,9	8,66	27,53	0,95

O valor de  $\beta$  mais alto de todas as blindagens testadas, 8,66, indica que a blindagem de 50% com tecido de fIQUE é a que possui distribuição mais estreita de indentações, tornando-se uma blindagem relativamente confiável. Contudo dentre as frações a que apresenta melhor ajuste, ou seja, mais homogeneidade de valores, é a de 40% com tecido de fIQUE. O maior valor encontrado de indentação foi para a fração de 50% com tecido.

**Tabela 2.** Indentação produzida na plastilina por diferentes SBMs como segunda camada

Material de segunda camada	Trauma (mm)	Referência
Epóxi reforçado com 30%vol. Tecido de FIQUE	22±5	PT
Epóxi reforçado com 30%vol. Tecido de Juta	21±3	[4]
Epóxi reforçado com 30%vol. Tecido de Rami	17±1	[8]
Epóxi puro	21±2	[9]
Kevlar <sup>TM</sup>	23±3	[9]

Levando em consideração a integridade do corpo de prova após o impacto e o valor de indentação provocado na plastilina, a fração de 50% com tecido de fIQUE foi considerado o SBM com melhor desempenho balístico. Quanto a fração de 30% de tecido no compósito, em comparação com outros SBM, teve desempenho inferior aos dos compósitos com de tecido de juta e rami, bem como o valor de indentação também é inferior quando comparado com valor obtido para o Kevlar<sup>TM</sup>.

### 3 CONCLUSÃO

Os testes balísticos revelaram que os SBM ensaiados atenderam ao limite de trauma NIJ após o impacto com munição de alta velocidade de 7,62 x 51 mm. O desempenho balístico do compósito de matriz epóxi reforçado com 50% vol. de tecido de fIQUE foi considerado ser o melhor em comparação com os demais, e, dentro da precisão estatística, foi semelhante ao do tecido de aramida.

### Agradecimentos

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

## REFERÊNCIAS

- 1 Luz FS, Monteiro SN, Lima ES, Lima Jr EP. Ballistic application of coir fiber reinforced epoxy composite in multilayered armor. *Materials Research*. 2017; 20(Suppl.2): 23-38.
- 2 Abidin MHZ, Mohamad MAH, Zaidi AMA, Mat WAW. Experimental study on ballistic resistance of sandwich panel protection structure with kenaf foam as a core material against small arm bullet. *Applied mechanics and materials*. 2013; 315: 612-615.
- 3 Nascimento LFC, Louro LHL, Monteiro SN, Gomes AV, Lima Jr EPL, Marçal RLSB. Ballistic Performance in Multilayer Armor with Epoxy Composite Reinforced with Malva Fibers. In: Meyers M. et al. (eds) *Proceedings of the 3rd Pan American Materials Congress. The Minerals, Metals & Materials Series*. 2017: 331-338.
- 4 Luz FS, Lima Jr EP, Louro LHL, Monteiro SN. Ballistic test of multilayered armor with intermediate epoxy composite reinforced with jute fabric. *Materials Research*. 2015; 18(Suppl.2): 170-177.
- 5 Pereira AC, Monteiro SN, Assis FS, Ferreira CL, Simonassi NT, Weber RP, Oliveira MS, Colorado HA. Figue fabric: a promising reinforcement for polymer composites. *Polymers*. 2018; 10(3): 246-256.
- 6 NIJ Standard 0101.06, Ballistic Resistance of Personal Body Armor. US Department of Justice: Washington, DC, USA, 2008.
- 7 Santos JL, Marçal RLSB, Jesus PRR, Gomes AV, Lima Jr. EP, Monteiro SN, 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>-4wt pct Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ceramic compound. *Metallurgical and materials transactions A*. 2017; 48:4432.
- 8 Monteiro SN, Milanezi TL, Louro LHL, Lima Jr. EP, Braga FO, Gomes AV, Drelich JW. Novel ballistic ramie fabric competing with Kevlar™ fabric in multilayered armor. *Materials and design*. 2016; 96:263-269.
- 9 Monteiro SN, Louro LHL, Trindade W, Elias CN, Ferreira CL, Lima ES, Weber RP, Suarez JCM, Figueiredo ABS, Pinheiro WA, Silva LC, Lima Jr. EP. Natural curaua fiber-reinforced composites in multilayered ballistic armor. *Metallurgical and materials transactions A*. 2015; 46:4567.