

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMA DE BLINDAGEM MULTICAMADAS ATRAVÉS DA REDUÇÃO DA CAMADA FRONTAL*

Artur Camposo Pereira¹

Fabio Da Costa Garcia Filho²

Fernanda Santos da Luz³

Luana Cristyne da Cruz Demosthenes⁴

Michelle Souza Oliveira⁵

Ulisses Oliveira Costa⁶

Wendell Bruno Almeida Bezerra⁷

Sergio Neves Monteiro⁸

Resumo

Recentemente o uso de sistemas de blindagem multicamadas (SBM) utilizando materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras naturais tem sido estudado como potencial candidato para substituição desses mesmos sistemas que empregam fibras sintéticas na sua estrutura, como a fibra de aramida (Kevlar™). De fato, já foi mostrado que um SBM composto de material cerâmico como primeira camada, compósitos de fibras naturais como segunda camada e liga metálica como terceira possuem a mesma eficiência balística do que aqueles que utilizam laminados de Kevlar™ como segunda camada. No entanto, quando consideramos outros materiais como o Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM) o baixo peso associado às placas aliado com a eficiência balística fazem com que esses sejam os materiais preferidos para utilização como proteção pessoal nível III, ainda que o processamento desses materiais tenha um alto custo. Desta forma, para competir com PEUAPM é necessário que os SBM com compósitos de fibra natural apresentem uma diminuição de peso do sistema. No presente trabalho, um SBM compostos de cerâmica de alumina como primeira camada e compósito de matriz epóxi reforçado com tecido de juta como segunda camada. O objetivo foi tentar otimizar a espessura da primeira camada e conseqüentemente o peso do sistema como um todo. A fibra de juta é uma das fibras lignocelulósicas naturais (FNLs) mais estudadas e apresenta uma excelente relação entre resistência e peso por isso tem potencial para aplicações de engenharia. A espessura da camada cerâmica foi variando desde 10 até 7 mm. Testes balísticos foram realizados e os resultados de profundidade de indentação foram utilizados como medida da eficiência do SBM. A redução da espessura apresentou resultados abaixo daqueles previstos em norma mesmo com 7 mm de primeira camada, e ainda é previsto uma redução no custo e peso dos SBM.

Palavras-chave: Blindagem multicamada; Otimização de peso; Fibra natural; Juta.

OPTIMIZATION OF MULTICAMBERED ARMOR SYSTEM THROUGH FRONT LAYER REDUCTION

Abstract

Recently the use of multilayer armor systems (MAS) using natural fiber reinforced polymer matrix composites has been studied as a potential candidate for substitution of these same systems that employ synthetic fibers in their structure, such as aramid fiber (Kevlar™). In fact, it has already been shown that a MAS composed of ceramic material as first layer, natural fiber composites as second layer and metal alloy as third have the same ballistic efficiency as those using Kevlar™ laminates as second layer. However, when considering other materials such as Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHWP) the low weight associated with the plates combined with ballistic efficiency make these materials preferred for use as a level III personal protection, although the processing of these high cost. Thus, in order to compete with UHWP it is necessary that MASs with natural fiber composites present a decrease in system weight. In the present work, a MAS composed of alumina ceramic as first layer and epoxy matrix composite reinforced with jute fabric as second layer. The objective was to try to optimize the thickness of the first layer and consequently the weight of the system. Jute fiber is one of the most studied natural lignocellulosic fibers (LNFs) and

presents an excellent relationship between strength and weight, so it has potential for engineering applications. The thickness of the ceramic layer varied from 10 to 7 mm. Ballistic tests were performed and the indentation depth results were used as a measure of the MAS efficiency. The reduction of the thickness presented results below those foreseen in standard even with 7 mm of first layer, and a reduction in the cost and weight of MAS.

Keywords: Multilayer armor; Weight optimization; Natural fiber; Jute.

- ¹ *Engenheiro Metalúrgico, doutorando em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.*
- ² *Engenheiro Metalúrgico, doutorando em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.*
- ³ *Engenheira de Materiais, doutora em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.*
- ⁴ *Engenheira Civil, doutorando em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.*
- ⁵ *Engenheira Civil, doutorando em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.*
- ⁶ *Engenheiro de Materiais, mestrando em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.*
- ⁷ *Engenheiro de Materiais, mestrando em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.*
- ⁸ *Engenheiro Metalúrgico, PhD em Materials Science And Engineering, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A proteção balística de pessoal, equipamentos e veículos é hoje de grande importância devido a conflitos urbanos armados e guerras regionais envolvendo poder de fogo cada vez maior. Em particular, o uso de munição de alta velocidade, impacto e potência, como a classe III [1], 7,62 x 51 mm (7,62 mm), constitui uma grande ameaça pessoal. Neste caso, blindagem de camada única, como as feitas com Kevlar™ (fibras de aramida) exigiria uma grande espessura e interferiria na mobilidade do usuário.

Para proteção, o sistema de blindagem multicamada (SBM) que normalmente é composto por três diferentes materiais e tem como objetivos impedir de proteção balística classe III e uma maior mobilidade ao usuário. Como camada frontal, tem-se um material cerâmico devido a sua elevada resistência à compressão e dureza com um material frontal duro e quebradiço, como uma cerâmica [2-5], é uma solução eficaz [2-5]. Como camada intermediária, normalmente são utilizados os laminados de tecido de aramida, como Kevlar™ e Twaron™ [2-6], bem como o polietileno de ultra alto peso molecular, como Dyneema™ e Spectra™ [7-8]. Essa camada tem como objetivo impedir a penetração dos fragmentos tanto da cerâmica como do projétil [2-8]. Por fim, como terceira camada, tem-se um material metálico leve e dúctil a transportada pela onda de choque de impacto de bala [9].

O Kevlar™ é hoje uma opção de material comum usado na fabricação de blindagens balísticas. No entanto, materiais naturais menos caros podem ser usados como segunda camada. Por exemplo, compósitos reforçados com fibras lignocelulósicas naturais estão sendo extensivamente investigados como alternativas econômicas e sustentáveis [10-17] para substituir compostos de fibra sintética. Aplicações bem-sucedidas de compósitos de fibras naturais estão ocorrendo principalmente na indústria automotiva [18-20]. Outro setor aplicado onde os compósitos naturais estão sendo investigados recentemente são as armaduras balísticas [21-30]. Descobriu-se que as fibras naturais e os compósitos reforçados com polímeros apresentam desempenho balístico comparável ao Kevlar™, quando usado na segunda camada da MAS [24-30].

Além da espessura já mencionada, outro fator importante para garantir eficiência de um SBM é o peso. Garantindo a eficiência da blindagem junto com o menor peso possível, o usuário poderá alcançar seus objetivos com maior facilidade. Para se obter maior redução de peso de um SBM, é necessário a redução da dimensão da cerâmica. No qual, a cerâmica representa a maior densidade entre os materiais constituintes da blindagem [31].

No presente trabalho foi estudado o desempenho balístico do SBM variando a espessura da camada cerâmica entre 10, 9, 8 e 7 mm de espessura. Utilizando como segunda camada compósitos de matriz epóxi reforçados com 30% em volume de tecido de juta, a configuração do SBM com apenas uma pastilha cerâmica é ilustrada na Figura 1. Testes balísticos foram realizados e os resultados de profundidade de indentação foram utilizados como medida da eficiência do SBM. Foi calculado o custo e a variação de peso dos SBM.

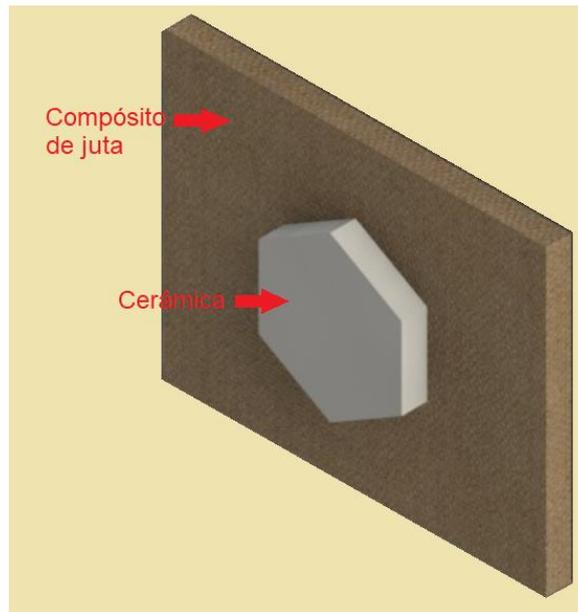


Figura 1. Representação esquemática da blindagem multicamadas com a cerâmica e o compósito com tecido de juta.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A fabricação da blindagem multicamada foi dividida em três etapas: a fabricação da pastilha cerâmica, preparação do compósito poliéster-fique e montagem do sistema. Para a preparação do material cerâmico, primeira camada da blindagem, foi utilizada a alumina (Al_2O_3) dopada com nióbia (Nb_2O_5) na proporção na de 4% em massa com geometria hexagonal. Os pós de alumina, nióbia e o polietileno glicol, em fase líquida, foram devidamente pesados e em seguida acondicionados num moinho de bolas de alumina por 12h. Após este processo, o material foi deixado por 48h na estufa a 80°C para secagem. Com o material seco, ocorreram às etapas de maceração e peneiramento para obtenção do pó e, em seguida, ocorreu à prensagem sob uma pressão de 30 MPa. Com isso, foram obtidos corpos verdes os quais foram levados ao forno para que fossem sinterizados.

A confecção da placa de compósito, de dimensões 31 x 25 x 1 cm, de matriz de epóxi reforçado com 30% em volume de tecido de juta orientadas e alinhadas, foram fabricadas com auxílio da empresa Barracuda, Rio de Janeiro – Brasil. Na Figura 2 é apresentado o compósito com tecido de juta fabricado no sistema a vácuo da empresa.



Figura 2. Compósito de matriz epóxi reforçada com 30% em volume de tecido de juta.

A preparação dos corpos de prova multicamada foi realizada por meio da colagem das camadas do compósito e da cerâmica, utilizando cola de cura rápida ULTRAFLEX, que não interfere nos testes.

O ensaio balístico tem por finalidade verificar a capacidade de absorção de energia cinética resultante do impacto de um corpo em movimento. No referido trabalho foi observado a deformação na plastilina (massa que simula o corpo humano), provocada pelo disparo demonstrando, assim, o nível de proteção balística do sistema de blindagem. Na Figura 3 é mostrado esquematicamente o sistema utilizado para a realização desses ensaios, bem como o corpo de prova da blindagem multicamada após a colagem das camadas preso na plastilina.

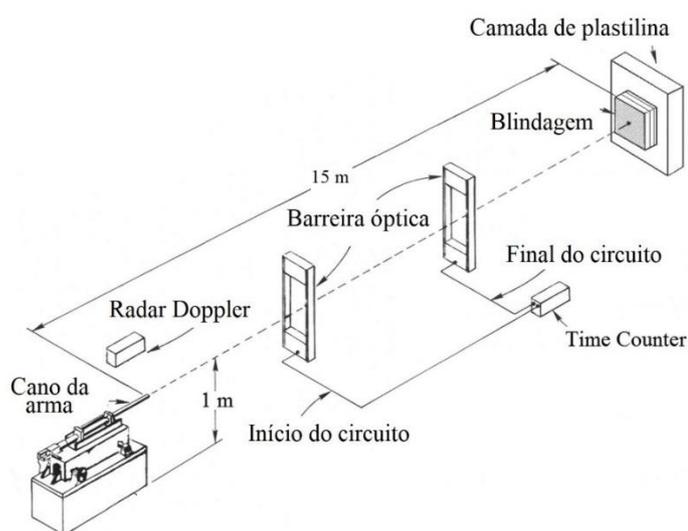


Figura 3. Esquema do sistema utilizado para os ensaios balísticos.

Para a realização dos testes balísticos foram utilizadas munições de calibre 7,62 x 51 mm M1 com massa de 9,7 g, conforme é fornecida comercialmente ao Exército; dispositivo de disparo com provete de calibre 7,62 dotado de mira laser e um dispositivo de fixação do alvo; um distância do alvo de 15 metros, conforme previsto na norma NIJ 0101.06 para as munições 7,62 x 51 mm; um ângulo de incidência no alvo de 90°; foi realizado no Centro de Avaliações do Exército (CAEx).

Após o ensaio balístico, a profundidade de indentação, causada pelo impacto do projétil na blindagem multicamada, foi produzida na plastilina. Os valores da profundidade de indentação foram obtidos utilizando um paquímetro (precisão 0,01 mm) com sensor laser.

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

A configuração final antes do teste balístico do SBM com as vinte e cinco pastilhas cerâmicas junto com o compósito reforçado com tecido de juta é mostrado na Figura 4. As marcas de coloração preta são oriundas da cola.



Figura 4. Configuração final antes do teste balístico do SBM.

Os resultados da profundidade máxima na plastilina obtidos no ensaio balístico são mostrados na Tabela 1. Todos os valores abaixo do previsto em norma que é 44mm.

Tabela 1. Valores das profundidades máximas na plastilina.

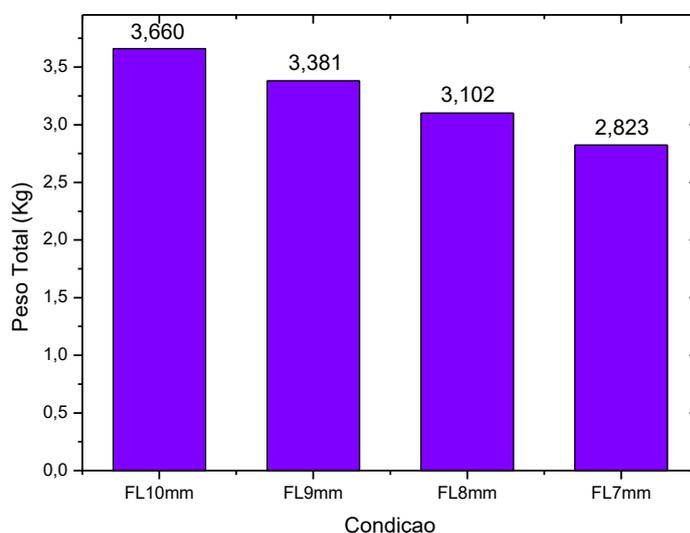
Condição	Profundida Máxima (mm)
FL10mm	20,7
FL9mm	27,8
FL8mm	35,2
FL7mm	39,0

Para o cálculo do peso do SBM, considerou a placa de 30 x 25 x 1 cm para o compósito e 30 x 25 x R mm para o cerâmico com R sendo a espessura da camada otimizada. Os valores obtidos estão na Tabela 2.

Tabela 2. Valor de peso para cada SBM otimizada.

Compósito	Cerâmica	
	Condição	Peso (Kg)
Matriz epóxi reforçada com 30vol% juta		
0,870 Kg	FL10mm	2,790
	FL9mm	2,511
	FL8mm	2,232
	FL7mm	1,953

Considerando o peso total dos SBM, exibido na Figura 5, indicam uma expressiva redução de peso de 2,823 Kg na configuração de 7 mm para 3,660 Kg de 10 mm de espessura. Isso representa uma redução de até 33% de peso.

**Figura 5.** Valor do peso total de cada SBM.

Uma análise de custo focando no material compósito de matriz epóxi reforçado com fibra de juta somado com os valores das cerâmicas estão exibidos na Tabela 3.

Tabela 3. Análise de custo do compósito e a cerâmica em um SBM.

Compósito	Cerâmica	
	Condição	Custo (US\$)
Matriz epóxi reforçada com 30vol% juta		
US\$ 1,78	FL10mm	6,08
	FL9mm	5,47
	FL8mm	4,86
	FL7mm	4,26

Os valores do custo total do SBM, exibido na Figura 6, demonstra que ao reduzir a espessura da cerâmica – consequentemente a quantidade de material – o custo final é reduzido. Valor total de US\$7,86 para espessura de 10 mm é reduzido para US\$6,04 para a espessura de 7 mm. Isso representa uma redução significativa de até 23%.

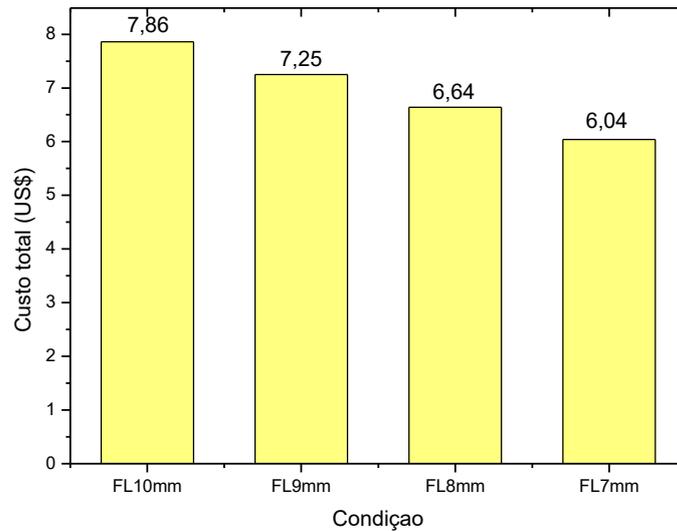


Figura 6. Análise do custo total do SBM.

4 CONCLUSÃO

Testes balísticos em um sistema de blindagem multicamada (SBM) constituído com quatro configurações de espessura cerâmica – 10, 9, 8 e 7 mm – junto com um compósito de matriz epóxi reforçado com 30% em volume de tecido de juta apresentaram valores de indentação abaixo que é estabelecido pela norma, ou seja, menor que 44 mm.

A redução de peso total em um SBM chegou em um valor de até 2,823 Kg para a espessura de 7 mm da cerâmica. Essa redução de peso em relação com a espessura de 10 mm chegou em um valor de até 33%.

O custo calculado para essa configuração – compósito junto com a cerâmica – demonstrou uma redução de até 23%. O menor valor obtido foi para a espessura de 7 mm da cerâmica.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio das agências brasileiras: CNPq, FAPERJ e CAPES para o desenvolvimento deste trabalho. Ao Centro de Avaliação do Exército – CAEx pela realização dos testes balísticos.

REFERÊNCIAS

- 1 NIJ Standard 0101.06, Ballistic Resistance of Personal Body Armor, US Depart. of Justice, Washington DC, July 2008.
- 2 Li, R.; Fan, Q.; Gao, R.; Huo, L.; Wang, F.; Wang, Y. Effects of dynamic mechanical properties on the ballistic performance of new near- β titanium alloy Ti684, Mater. Des. 2014, 62, 233-240.
- 3 Tasdemirci, A.; Tunusoglu, G.; Guden, M. The effect of the interlayer on the ballistic performance of ceramic/composite armors: experimental and numerical study. Int. J. Impact Eng. 2012, 44, 1-9.

- 4 Jacobs, M.J.N.; Van Dingenen, J.L.J. Ballistic protection mechanisms in personal armor. *J. Mater. Sci.* 2001, 36(13), 3137-3142.
- 5 Abrate, S. *Ballistic Impact on Composite Structures*, 1st ed., Cambridge: Cambridge University Press, 1998, pp. 215-220.
- 6 Lee, Y.S.; Wetzel, E.D.; Wagner, N.J. The ballistic impact characteristic of Kevlar® woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid. *J. Mater. Sci.* 2003, 38(13), 2825–2833.
- 7 Morye, S.S.; Hine, P.J.; Duckett, R.A.; Carr, D.J.; Ward, I.M. Modeling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact. *Compos. Sci. Technol.* 2000, 60(14), 2631-2642.
- 8 Lee, B.L.; Song, J.W.; Ward, J.E. Failure of Spectra® polyethylene fiber-reinforced composites under ballistic impact loading. *Compos. Mater.* 1994, 28(13), 1202-1226.
- 9 Medvedovski, E. Ballistic performance of armor ceramics: influence of design and structure. *Ceram. Int.* 2010, 36(7), 2103-2127.
- 10 Mohanty, A.K.; Misra, M.; Drzal, L.T. Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world. *J. Polym. Environm.* 2002, 10(1), 19-26.
- 11 Netravali, A.N.; Chabba, S. Composites get greener. *Mater. Today* 2003, 6(4), 22-29.
- 12 Crocker, J. Natural materials innovative natural composites. *Mater. Technol.* 2008, 23(3), 174-178.
- 13 John, M.J.; Thomas, S. Biofibers and biocomposites. *Carbohydr. Polym.* 2008, 71(3), 343-364.
- 14 Monteiro, S.N.; Lopes, F.P.D.; Barbosa, A.P.; Bevitori, A.B.; Silva, I.L.A.; Costa, L.L. Natural lignocellulosic fibers as engineering materials: an overview. *Metall. Mater. Trans. A* 2011, 42(10), 2963- 2974.
- 15 Faruk, O.; Bledzki, A.K.; Fink, H.P.; Sain, M. Biocomposites reinforced with natural fibers. *Progr. Polym. Sci.* 2012, 37(11), 1555-1596.
- 16 Thakur, V.K.; Thakur, M.K.; Gupta, R.K. Review: raw natural fibers based polymer composites. *Int. J. Polym. Anal. Charact.* 2014, 19(3), 256-271.
- 17 Güven, O.; Monteiro, S.N.; Moura, E.A.B.; Drelich, W. Re-emerging field of lignocellulosic fiber-polymer composites and ionizing radiation technology in their formulation. *Polym. Reviews* 2016, 56(4), 702-736.
- 18 Holbery, J.; Houston, D. Natural fiber reinforced polymer composites in automotive applications. *JOM* 2006, 58(11), 80-86.
- 19 Zah, R.; Hischier, R.; Leal, A.L.; Brown, I. Curaua fibers in automobile industry: a sustainable assessment. *Journal of Cleaner Production.* 2007, 15(11-12), 1032-1040.
- 20 Thomas, S.; Paul, S.A.; Pothan, L.A.; Deepa, B. Natural fibers: Structure, properties ad applications, In: S. Kalia, B.S.; Kath, I.; Kaur, eds. *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany, 2011, pp. 3-42
- 21 Ali, A.; Shaker, Z.R.; Khalina, A.; Sapuan, S.M. Development of anti-ballistic board from ramie fiber. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 2011, 50(6), 622-634.
- 22 Wambua, P.; Vangrimde, B.; Lomov, S.; Verpoest, I. The response of natural fiber composites to ballistic impact by fragment simulating projectiles. *Compos. Struct.* 2007, 77(2), 232-240.
- 23 Abidin, M.H.Z.; Mohamad, M.A.H.; Zaidi, A.M.A.; Mat, W.A.W. Experimental study on ballistic resistance of sandwich panel protection structure with kenaf foam as a core material against small arm bullet. *Appl. Mech. Mater.* 2013, 315, 612-615.
- 24 Cruz, R.B.; Lima Jr., E.P.; Monteiro, S.N.; Louro, L.H.L. Giant bamboo fiber reinforced epoxy composite in multilayered ballistic armor. *Mat. Res.* 2015, 18(Suppl 2), 70-75.
- 25 Monteiro, S.N.; Louro, L.H.L.; Trindade, W.; Elias, C.N.; Ferreira, C.L.; Lima, E.S.; Weber, R.P.; Suarez, J.M.; Figueiredo, A.B.; Pinheiro, W.A.; Silva, L.C.; Lima Jr., E.P. Natural curaua fiber-reinforced composites in multilayered ballistic armor. *Metall. Mater. Trans. A* 2015, 46(10), 4567-4577.

- 26 Rohen, L.A.; Margem, F.M.; Monteiro, S.N.; Vieira, C.M.F.; Araujo, B.M.; Lima, E.S. Ballistic efficiency of an individual epoxy composite reinforced with sisal fibers in multilayered armor. Mater. Res. 2015, 18(Suppl 2), 55-62.
- 27 Monteiro, S.N.; Braga, F.O.; Lima Jr., E.P.; Louro, L.H.L.; Silva, L.C.; Drelich, J.W. Promising curaua fiber-reinforced polyester composite. Polym. Eng. Sci. 2016, <http://dx.doi.org/10.1002/pen.24471>.
- 28 Luz, F.S.; Lima Jr, E.P.; Louro, L.H.L.; Monteiro, S.N. Ballistic test of multilayered armor with intermediate epoxy composite reinforced with jute fabric. Mater. Res. 2015, 18(Suppl 2), 170-177.
- 29 Monteiro, S.N.; Milanezi, T.L.; Louro, L.H.L.; Lima Jr., E.P.; Braga, F.O.; Gomes, A.V.; Drelich, J.W. Novel ballistic ramie fabric composite competing with Kevlar™ fabric in multilayered armor. Mater. Design 2016, 96, 263-269.
- 30 da Luz, F.S.; Monteiro, S.N.; Lima, E.S.; Lima Jr., E.P. Ballistic application of coir fiber reinforced epoxy composite in multilayered armor. Mater. Research, in press (DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2016-0951).
- 31 Braga, F.O.; Lopes, P.H.L.M.; Oliveira; M.O., Monteiro, S.N.; Lima, E.P. Thickness assessment and statistical optimization of a 3-layered armor system with ceramic front and curaua fabric composite/aluminum alloy backing. Composites Part B 166 (2019) 48–55