

AVALIAÇÃO BALÍSTICA DE COMPÓSITOS EPÓXI-RAMI E EPÓXI-ARAMIDA UTILIZADOS EM BLINDAGENS CERÂMICAS MULTICAMADA*

Fábio de Oliveira Braga^{1,2}
Thiago Lara Milanezi³
Sergio Neves Monteiro⁴
Luís Henrique Leme Louro⁵
Alaelson Vieira Gomes⁶
Édio Pereira Lima Jr.⁷

Resumo

A proteção balística contra projéteis de alta energia, como o 7,62 mm, é mais eficientemente realizada por meio de sistemas de blindagem multicamada (SBM). Estes são formados, em geral, por uma camada frontal de cerâmica, uma camada intermediária de tecido sintético ou de compósito, e uma camada posterior de um metal dúctil. Em trabalho recente, Monteiro *et al.* (2016) estudaram um SBM com camada intermediária formada por compósito reforçado com tecido de rami em substituição a um laminado tecido de aramida. Eles obtiveram resultados satisfatórios com boa redução de custo. No presente trabalho, foram investigadas fibras de rami *in-natura* como substituição ao tecido de rami na camada intermediária compósita. Os resultados foram comparados ao desempenho de um compósito reforçado com 30% de tecido de aramida, bem como aos resultados anteriores. Observou-se que a utilização dos compósitos reforçados com fibras de rami manteve o bom desempenho do SBM, com um custo cerca de 5 vezes menor que o SBM com aramida, e 60% menor que com tecido de rami.

Palavras-chave: Ensaio balístico; fibra de rami; compósito; aramida.

BALLISTIC EVALUATION OF EPOXY-RAMIE AND EPOXY-ARAMID COMPOSITES USED IN CERAMIC MULTILAYERED ARMORS

Abstract

The ballistic protection against high energy projectiles, such as the 7.62 mm, is more efficiently performed by means of multilayered armor systems (MAS). They are composed of a ceramic front, a synthetic fiber fabric or composite intermediate layer, and a ductile metal backing. In a recent investigation, Monteiro *et al.* (2016) studied a MAS with intermediate layer of composite reinforced with ramie fabric substituting an aramid fabric laminate. They obtained satisfactory results with good cost reduction. In the present work, raw ramie fibers were investigated as substitution to the ramie fabric in the composite intermediate layer of the MAS. The results were compared to the performance of a composite reinforced with 30% aramid fabric, as well as to the previous results. It has been observed that ramie fibers maintained the good ballistic behavior of the MAS, with 5 times lower cost than the MAS with aramid, and 60% less than with ramie fabric..

Keywords: Ballistic tests; ramie fiber; composite; aramid.

¹ Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Candidato ao Doutorado em Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. fabio_obra@yaho.com.br.

² Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Docente, Graduação Tecnológica em Processos Metalúrgicos, Faculdade SENAI Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- ³ *Engenheiro Mecânico e de Automóveis, M.Sc., Docente, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ⁴ *Engenheiro Metalurgista, Ph.D., Docente, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ⁵ *Engenheiro, Ph.D., Docente, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ⁶ *Engenheiro Metalurgista, D.Sc., Docente, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ⁷ *Engenheiro Mecânico, M.Sc., Candidato ao Doutorado, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A proteção balística contra projéteis de alta energia, como o 7,62 mm, é mais eficientemente realizada por meio de sistemas de blindagem multicamada (SBM). Estes sistemas combinam características específicas de diferentes materiais, que contribuem sinergicamente para a eficiência total do sistema. Os sistemas baseados em apenas um tipo de material (como as blindagens de aço ou alumínio) somente conseguem deter tais projéteis no caso de grandes espessuras e/ou pesos [1,2].

Um SBM típico é constituído de uma camada frontal de um material cerâmico, uma camada intermediária de tecido sintético ou de material compósito, e uma camada posterior de um metal dúctil. O material cerâmico, por ser rígido e duro, tem por finalidade fragmentar a ponta do projétil e absorver a maior parte de sua energia por meio de fragmentação dinâmica. O compósito, por sua vez, absorve mais uma parcela da energia e absorve os estilhaços do projétil e da cerâmica fraturada. O alumínio absorve o restante da energia por meio de deformação plástica [3,4].

Os materiais tradicionalmente utilizados na camada intermediária são os tecidos como a aramida (Kevlar®) e o polietileno de ultra alto peso molecular (Dyneema®). Recentemente, compósitos reforçados por fibras naturais têm sido investigados, por mostrarem bom desempenho balístico, e por serem de baixo peso, baixo custo e ambientalmente corretos [4-6]. Em trabalho recente, Monteiro et al., 2016 [6], estudaram um SBM com camada intermediária formada por compósito reforçado com tecido de rami, em substituição a um laminado de tecido de aramida, cujas camadas são unidas por elastômero. Eles obtiveram resultados satisfatórios com boa redução de custo.

Este trabalho se depara com o seguinte problema: É possível diminuir ainda mais o custo do SBM ao substituir o tecido de rami, por suas fibras *in-natura*? Além disso, existe diferença entre o comportamento balístico do laminado de aramida estudado por Monteiro et al (2016) e um compósito de matriz epoxídica reforçado com 30% de tecido de aramida, quando estes são utilizados em SBMs?

Portanto, o objetivo do presente trabalho é analisar o comportamento balístico de um compósito reforçado com fibras de rami *in-natura* e com tecido de aramida, quando utilizados como camada intermediária em um SBM.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O SBM utilizado neste trabalho consiste de uma camada frontal da cerâmica $Al_2O_3-4\%Nb_2O_5$, que recebe diretamente o impacto do projétil, uma camada intermediária de compósito reforçado com 30 % de fibras de rami ou tecido de aramida, e uma camada posterior de liga de Alumínio 5052 H34, conforme esquema apresentado na Figura 1.

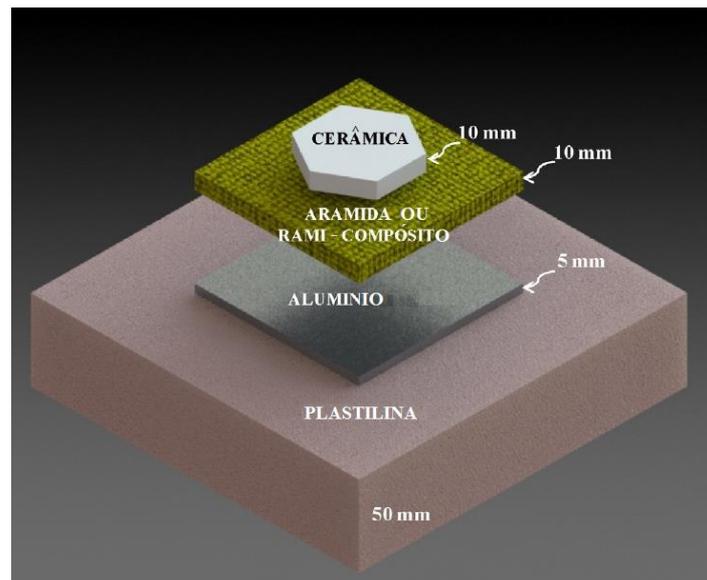


Figura 1. Sistema de blindagem multicamada do presente trabalho em frente ao bloco de material de referência (plastilina).

A alumina (Al_2O_3) foi fornecida pela empresa Treibacher Schleifmittel e a nióbia (Nb_2O_5) pela CBMM. O processamento da cerâmica incluiu mistura e moagem dos pós via úmida com adição da água e do ligante polietileno glicol (PEG), secagem em estufa por 48h, peneiramento até 0.355 mm (42 mesh), prensagem a frio e sinterização com patamares em 158°C (1h, evaporação do PEG) e em 1400°C (3h). Algumas propriedades dos materiais produzidos são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Características da cerâmica utilizada.

Característica	Média	Desvio Padrão
Densidade do sinterizado (g/cm^3)	3.51	0.06
Microdureza Vickers (HV)	386	40
Tamanho de grão (mm)	3	1

As placas de alumínio 5052 H34 foram fornecidas pela empresa METINOX, e algumas de suas características são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Características da liga de alumínio utilizada.

Propriedade mecânica	Média	Desvio Padrão		
Resistência à tração (MPa)	244.35 ^a	2.35		
Limite de escoamento (MPa)	78.95 ^a	6.17		
Deformação total (%)	3.86 ^a	0.27		
Dureza (HRB) ^b	20.0	0.7		
Composição química ^c	Al	Mg	Ag	Cr
Teor dos elementos (%)	96.74	2.37	0.74	0.16

^a Média de 3 ensaios de tração.

^b Dureza em escala Rockwell B, utilizando esfera de 5mm e 750g de carga.

^c Dados obtidos em análise qualitativa por Espectrometria de dispersão de energia dos elétrons (EDS).

As fibras de rami (Figuras 2 e 3) foram fornecidas pela empresa Amazon Paper. Estas foram secas em estufa a 60°C por 24h para fabricação dos compósitos. O tecido de aramida (Figuras 4 e 5), por sua vez, foi fornecido pela

empresa LFJ Blindagens. Consiste de um tecido de trama simples, composto por fibras de Kevlar® 29, com gramatura de 450 g/m².

A resina epoxídica foi fornecida pela empresa Resinpoxy, com a designação de “Resina 610”. Foi adicionado endurecedor trietileno tetramina (TETA) na proporção de 13% em peso, e esta mistura foi adicionada juntamente com as fibras de rami (ou tecido de aramida) na cavidade de uma matriz de aço, mantendo-se sob pressão de 3 MPa até a cura (em temperatura ambiente por 24h). Os compósitos fabricados possuem a forma de placas retangulares de dimensões 120 x 150 x 10.0 mm, na proporção 30% em volume.



Figura 2. Aspecto geral das fibras de rami *in-natura*.

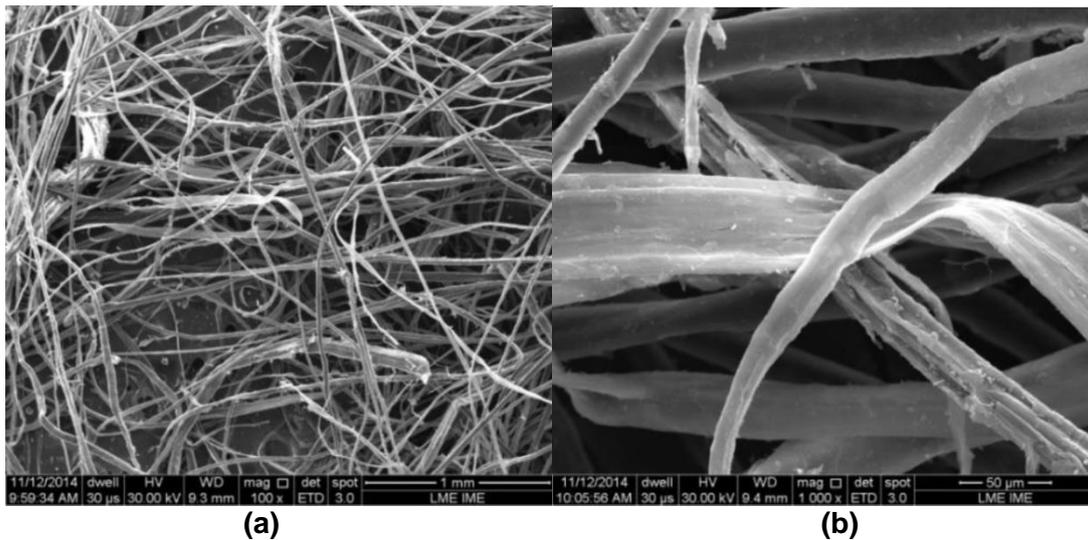


Figura 3. Micrografias eletrônicas das fibras de rami: (a) 100x; (b) 1.000x.

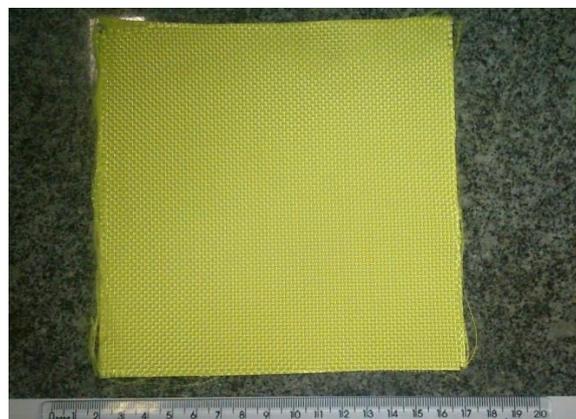


Figura 4. Aspecto geral de uma peça de tecido de aramida.

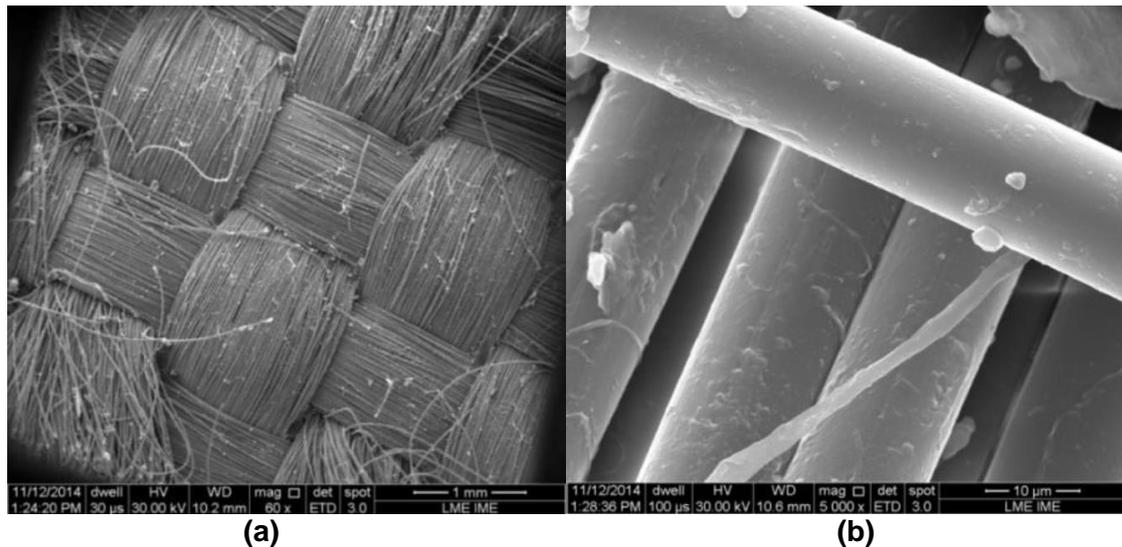


Figura 5. Micrografias eletrônicas do tecido de aramida: (a) 60x; (b) 5.000x.

Os SBMs foram submetidos ao impacto balístico com projéteis de 7,62 x 51 mm M1, com massa de 9.3 g, comercialmente fornecida ao Exército Brasileiro. O dispositivo de disparo, disponível no Centro de Avaliações do Exército (CAEx), consiste de um provete 7.62 mm (Figura 6a), localizado a 15m do alvo (blindagem), conforme previsto na norma ABNT 15000 [7]. O disparo foi realizado na horizontal ($\theta=0^\circ$). A blindagem foi posicionada em frente a um bloco de plastilina (Figura 6b), com densidade de cerca de 1,7 g/cm³, para que a deformação na blindagem fosse medida pela indentação deixada na plastilina, também chamada de “trauma”. Esta metodologia é especificada pela norma NIJ-0101.06 [8]. A Figura 7 mostra os SBMs com camada intermediária de compósitos de rami (Figura 7a) e de aramida (Figura 7b).

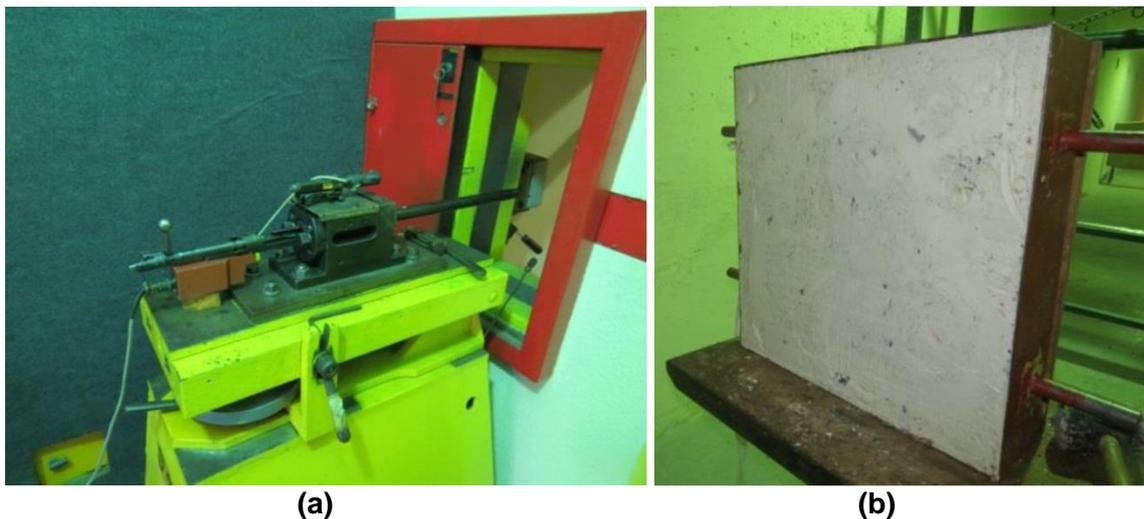


Figura 6. Ensaio balístico: (a) Provete; (b) bloco de argila, no qual é fixado o alvo.



Figura 7. SBMs fixados na plastilina para ensaio balístico, com camada intermediária de compósito de (a) fibra de rami e (b) tecido de aramida.

Foi medida a velocidade de cada projétil (V_i) por meio de uma barreira óptica HPI B471, e sua energia cinética de impacto (E_i) pode ser calculada pela equação 1.

$$E_i = \frac{mv_i^2}{2} \quad (1)$$

Onde: m = massa do projétil; v_i = velocidade de impacto do projétil na blindagem.

Foi realizado o exame *post-mortem* da blindagem, por meio da avaliação microscópica dos fragmentos. Estes puderam ser visualizados com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) Quanta FEG 250, utilizando elétrons secundários.

Os SBMs foram comparados não somente com base no desempenho balístico, mas também baseado em sua densidade superficial (D_s) e custo. A densidade superficial pode ser calculada pela equação 2.

$$D_s = D_1 + D_2 + D_3 = \frac{m_1 + m_2 + m_3}{A} \quad (2)$$

Onde: D_i ($i = 1, 2, 3$) = densidade superficial da i -ésima camada da blindagem; m_i = massa da i -ésima camada da blindagem; A = área coberta pela blindagem.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 mostra os valores de velocidade de impacto (V_i), energia de impacto (E_i) e trauma na plastilina para os diferentes SBMs utilizados como alvos do disparo. Nenhum dos corpos-de-prova foi perfurado, e todos os valores de trauma ficaram abaixo dos 44 mm, conforme especificado pela NIJ-0101.06 para o nível III de proteção. Portanto, considera-se satisfatório o desempenho de ambos os SBMs.

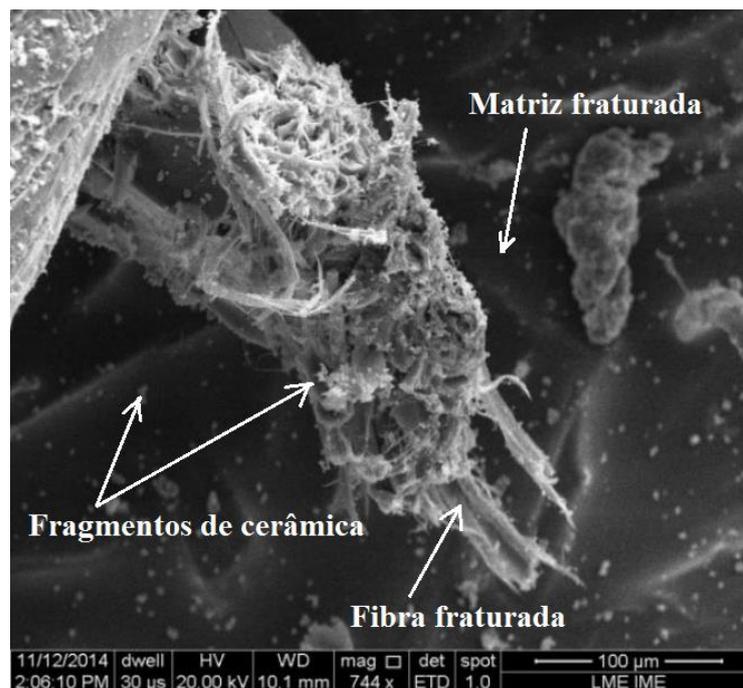
Comparando-se os resultados, observa-se que os SBMs utilizando os compósitos com fibras de rami ($18 \pm 2\text{mm}$) e tecido aramida ($18 \pm 1\text{mm}$) tiveram performance similar, entre si, e em relação ao SBM com tecido de rami ($17 \pm 1\text{mm}$), de Monteiro et al., 2016 [6]. O laminado de aramida, por outro lado, teve um desempenho inferior, provavelmente devido à menor absorção de energia da matriz elastomérica em relação à matriz epoxídica, que realiza esta função ao produzir superfícies de fratura [6].

Tabela 3. Parâmetros medidos no ensaio balístico e comparação com a literatura.

Camada intermediária	V_i (m/s)	E_i (m/s)	Trauma
Epóxi-30% fibras de rami ¹	834,07	3,25	19,57
	843,52	3,31	15,10
	846,10	3,34	17,99
Média	841 ±6	3,29 ±0,04	18 ±2
Epóxi-30% tecido de aramida ¹	845,99	3,33	17,21
	845,81	3,33	18,08
	852,47	3,38	18,70
Média	848 ±4	3,35 ±0,03	18 ±1
Epóxi-30% tecido de rami ²	-	-	17 ±1
Laminado de tecido de aramida com elastômero ²	-	-	21 ±3

¹ Presente trabalho.² Monteiro et al., 2016.

A Figura 8 mostra o aspecto de fratura da fibra de rami na região do impacto. A fratura é complexa, envolvendo ruptura das fibras, da matriz e separação entre as fases (delaminação). Além disso, podem ser observados pequenos estilhaços da cerâmica sobre toda superfície das fibras e da matriz. A fratura da fibra de aramida (Figura 9) teve um aspecto similar, apresentando os mesmos elementos.

**Figura 8.** Micrografia eletrônica da fratura de uma fibra de rami na região do impacto, 740x.

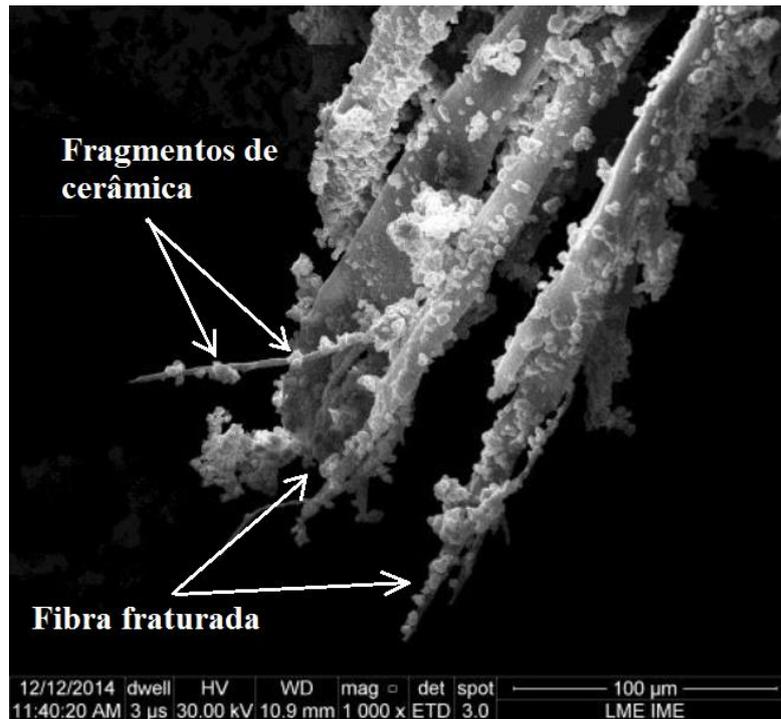


Figura 9. Micrografia eletrônica da fratura de uma fibra de aramida na região do impacto, 1.000x..

A Tabela 4 mostra os valores de densidade superficial e custo dos SBMs. Observa-se que além de apresentar um desempenho inferior, o laminado de tecido de aramida tem maior custo que os outros SBMs, devido à maior fração volumétrica de tecido de aramida (cerca de 87%), que é de alto custo. A utilização de compósitos possibilita uma melhor performance, além de diminuir o custo, devido à utilização de uma alta fração volumétrica de epóxi (70%), que apresenta boa absorção de energia do projétil, e tem baixo custo (US\$16,25/kg) em relação à aramida (US\$63,60/kg) [6]. A utilização de tecido de rami (US\$31,65/kg) consegue diminuir o custo em relação à aramida, possibilitando uma redução de cerca de 46%. A utilização de fibras de rami *in-natura* teve ainda maior diminuição no custo, com redução de 2,4 vezes em relação ao tecido de rami.

Tabela 4 Densidade superficial e custo dos SBMs.

Camada intermediária	Ds (kg/m ²)	Custo (US\$/kg)	Custo relativo
Epóxi-30% fibras de rami	59,25	12,9	1,0
Epóxi-30% tecido de aramida	60,06	30,5	2,4
Epóxi-30% tecido de rami	60,00	20,9 ¹	1,6
Laminado de tecido de aramida com neoprene	61,25	63,5 ¹	4,9

¹ Monteiro et al., 2016.

4 CONCLUSÃO

No presente trabalho foram estudados compósitos de matriz epoxídica reforçados com 30% de fibras de rami *in-natura*, bem como compósitos reforçados com tecido de aramida (Kevlar®) na camada intermediária de um sistema de blindagem multicamada (SBM). Observou-se comportamento similar entre ambos os compósitos tanto em absorção de energia do projétil, medido pelo trauma em

plastilina, quanto em mecanismos de fratura e de captura dos estilhaços. Os resultados de trauma foram comparados com os de compósitos reforçados com tecido de rami e laminados de aramida estudados por Monteiro et al., 2016. Ambos os compósitos do presente trabalho tiveram desempenho balístico similar ao compósito de tecido de rami, e melhores que o de laminado de aramida. A utilização das fibras de rami *in-natura* também resultou em considerável redução no custo dos SBMs, chegando a 5 vezes, no caso do laminado de aramida.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao CNPq pelo financiamento da pesquisa, através do processo 159753 de 2015-5, e ao CAEx pela execução dos ensaios balísticos.

REFERÊNCIAS

- 1 K. Akella, N.K. Naik, Composite armor – A review, J. Indian Inst. Sci., 95:3 (2015) 297–312.
- 2 M. Naebe, J. Sandlin, I. Crouch, B. Fox. Novel polymer-ceramic composites for protection against ballistic fragments, Polym. Compos., 34:2 (2013) 180-186.
- 3 CHEESEMAN, B.A.; BOGETTI, T.A. Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates. Composite Structures. 2003;61:161-173.
- 4 S.N. Monteiro, F.O. Braga, E.P. Lima, L.H.L. Louro, J.W. Drelich, Promising Curaua Fiber-Reinforced Polyester Composite for High-Impact Ballistic Multilayered Armor, Polym. Eng. Sci., Published Online (2016) doi: 10.1002/pen.24471.
- 5 S.N. Monteiro, V.S. Candido, F.O. Braga, L.T. Bolzan, R.P. Weber, J.W. Drelich, Sugarcane bagasse waste in composites for multilayered armor, Eur. Polym. J., 78 (2016) 173-185.
- 6 S.N. Monteiro, T.L. Milanezi, L.H.L. Louro, E.P. Lima Jr., F.O. Braga, A.V. Gomes, J.W. Drelich, Novel ballistic ramie fabric composite competing with KevlarTM fabric in multilayered armor, Mater. Design, 96 (2016) 263-269.
- 7 ABNT NBR 15000. Blindagens para impactos balísticos - classificação e critérios de avaliação. 2005
- 8 NIJ Standards-0101.06. Ballistic Resistance of Body Armor. U.S. Department of Justice/Office of Justice Programs - National Institute of Justice. 2000.