

# AVALIAÇÃO BALÍSTICA E DE FRATURA DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CURAUÁ UTILIZADOS EM BLINDAGENS MULTICAMADA\*

Fábio de Oliveira Braga<sup>1</sup>  
Sérgio Neves Monteiro<sup>2</sup>  
Noan Tonini Simonassi<sup>3</sup>

## Resumo

Um sistema de blindagem multicamada consiste de uma camada frontal de cerâmica, uma camada intermediária de fibras sintéticas ou de material compósito, e uma camada posterior de um metal dúctil. Recentemente, há o interesse em substituir as fibras sintéticas por fibras naturais, por suas propriedades adequadas, menor custo e peso. O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras naturais de Curauá em blindagens multicamada. Placas com 0, 10, 20 e 30% vol. de fibras integraram a blindagem que sofreu impacto balístico com munição 7.62 mm, e o dano foi avaliado pela indentação característica em plastilina e por uma análise microscópica das superfícies de fratura. Foi mostrado que a blindagem resiste ao impacto balístico, atendendo à norma NIJ-0101.04 para o nível de proteção III. Além disso, as fibras de Curauá são responsáveis por manter a coesão do compósito após o impacto balístico, e o compósito por dissipar parte da energia do projétil por mecanismos como delaminação, trincamento da matriz, fratura e descolamento das fibras.

**Palavras-chave:** Fibras naturais; Fibras de Curauá; Blindagem balística; Fratura.

## BALLISTIC AND FRACTURE EVALUATION OF CURAUUA FIBER REINFORCED COMPOSITES APPLIED TO MULTILAYERED ARMOR

### Abstract

A multilayered armor system consists of a frontal ceramics, an intermediate layer of synthetic fibers or composite material, and a ductile metal back layer. Recently, there is an interest to replace the synthetic fibers for natural fibers, due to its adequate properties, low cost and low weight. The aim of this work is to evaluate the ballistic performance of polyester matrix Curaua fiber reinforced composites in multilayered armors. Plates of 0, 10, 20 e 30% vol. fibers were part of the armor which has been hit by 7,62 mm bullet, and the damage has been evaluated by the backface signature in modelling clay and by a microscopic analysis of the fractured surfaces. It has been shown that the armor resists to the ballistic impact, as specified by NIJ-0101.04 standard to level III protection. Besides that, Curaua fibers are responsible to maintain the cohesion of the composite after the ballistic impact, and the composite must dissipate part of the projectile's energy, by mechanisms as delamination, matrix cracking, fiber fracture and debonding.

**Keywords:** Natural fibers; Curaua fibers; Ballistic armor; Fracture.

<sup>1</sup> Engenheiro Metalurgista, Bacharel, Mestrando em Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. [fabio\\_obraga@yahoo.com.br](mailto:fabio_obraga@yahoo.com.br).

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

<sup>3</sup> Graduando em Engenharia Metalúrgica, Estudante, Laboratório de Materiais Avançados, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

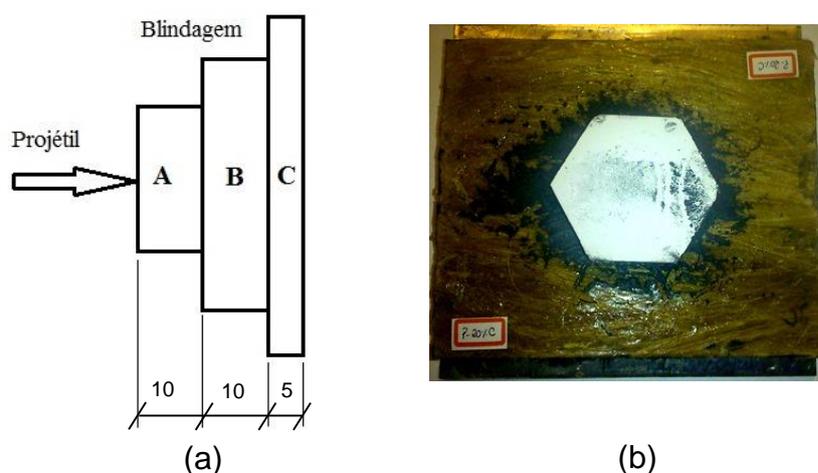
Atualmente, nenhum material apresenta por si só as propriedades necessárias para suportar um impacto balístico de um projétil 7.62 mm perfurante, exceto no caso de grandes espessuras. Uma solução para este problema é a utilização de sistemas de blindagem multicamada (SBM), que combinam as propriedades de diferentes materiais [1,2].

Um SBM típico possui uma camada frontal de um material cerâmico, uma camada intermediária de tecido de alto desempenho ou de material compósito, e uma camada posterior de um metal dúctil, como o alumínio. O material cerâmico tem a finalidade de absorver a maior parte da energia do projétil e fragmentar a sua ponta. O compósito serve para absorver mais uma parcela da energia proveniente do impacto balístico, bem como absorver os fragmentos do projétil e da cerâmica fraturada. O alumínio absorve o restante da energia por deformação plástica [3,4]. Os materiais mais utilizados na camada intermediária são os tecidos de fibras sintéticas como a aramida (Kevlar®) e o polietileno de ultra alto peso molecular (Dyneema®). Recentemente, diversos autores têm utilizado compósitos reforçados por fibras naturais, por possuírem propriedades adequadas, menor custo, por serem mais leves e por apresentarem menor impedância de choque [1,5-7,10].

O objetivo do presente trabalho consiste em avaliar o desempenho dos compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras de Curauá, ao serem utilizados como camada intermediária em SBMs, bem como identificar alguns mecanismos de fratura responsáveis por sua falha. Os SBM deverão ser submetidos ao impacto balístico com munição 7.62 x 51 mm perfurante.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O SBM utilizado neste trabalho consiste de uma camada frontal da cerâmica  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -4% $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (camada A, Figura 1a), que recebe diretamente o impacto do projétil, uma camada intermediária de compósito reforçado com fibras de Curauá (camada B, Figura 1a) e uma camada posterior de liga de Alumínio 5052 H34 (camada C, Figura 1a).



**Figura 1.** Sistema de blindagem multicamada: (a) Esquema ilustrativo da configuração e das dimensões das camadas. Medidas em mm; (b) Imagem frontal de um dos sistemas utilizados.

A alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) foi fornecida pela empresa Treibacher Scheifmittel e a nióbia ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) 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). Os materiais produzidos por esta rota já foram caracterizados por Da Luz, 2014 (Tabela 1) [7].

**Tabela 1.** Características da cerâmica utilizada.

<b>Característica</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Densidade do sinterizado (g/cm <sup>3</sup> )	3.51	0.06
Retração linear (%)	12.59	1.35
Densificação na queima (%)	87.65	1.40

Fonte: Da Luz, 2014 [7].

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.

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

<sup>a</sup> Média de 3 ensaios de tração.

<sup>b</sup> Dureza em escala Rockwell B, utilizando esfera de 5mm e 750g de carga.

<sup>c</sup> Dados obtidos em análise qualitativa por Espectrometria de dispersão de energia dos elétrons (EDS).

As fibras de Curauá foram fornecidas por produtores locais da região da Amazônia Paraense, localizados próximo à cidade de Santarém (PA). A resina poliéster, por sua vez, foi fornecida pela empresa RESINPOXY, com a designação de resina poliéster Cristal. Esta foi misturada ao endurecedor na proporção de 1% em peso, e também às fibras previamente secas em estufa (24h), em uma matriz de aço, mantendo-se sob pressão até a cura (temperatura ambiente, 24h). Os compósitos fabricados possuem a forma de placas retangulares de dimensões 119 x 150 x 10.0 mm, nas proporções de 0, 10, 20 e 30% em volume de fibras alinhadas, designados por P-0%C, P-10%C, P-20%C e P-30%C, respectivamente. A densidade dos compósitos foi calculada pela relação entre a massa e o volume.

Os SBM foram submetidos ao impacto balístico com projéteis de 7.62 x 51 mm M1 (Perfurante), com massa de 9.7 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, localizado a 15m do alvo (blindagem), conforme previsto na norma ABNT 15000 [8]. O disparo foi realizado na horizontal ( $\theta=0^\circ$ ). A blindagem foi posicionada em frente a um bloco de plastilina, com densidade de cerca de 1.7 g/cm<sup>3</sup>, para que a deformação na blindagem fosse medida pela indentação característica deixada na plastilina, conforme o especificado a norma NIJ-0101.04 [9]. Foi medida a velocidade de cada projétil por meio de um Radar Doppler, 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.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 mostra os valores de espessura ( $t$ ) e densidade dos compósitos ( $\rho$ ), bem como a medida da indentação característica (IC),  $v_i$  e a  $E_i$  do projétil ao atingir cada corpo-de-prova (CP) de sistema multicamada. Como todos os corpos-de-prova ensaiados pararam o projétil, ou seja, não sofreram penetração completa, o valor de  $E_i$  pode ser tomado como a energia absorvida ( $E_{abs}$ ) pela blindagem.

**Tabela 3.** Espessura e densidade dos compósitos, e medidas realizadas no ensaio balístico.

Tipo	CP	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$v_i$ (m/s)	$E_i$ (kJ)	$t$ (mm)	IC (mm)
P-0%C	1	1.10	829.37	3.34	9.45	23.30
	2	1.09	834.96	3.38	9.64	20.32
P-10%C	1	1.14	846.56	3.48	10.35	21.25
	2	1.10	834.45	3.38	10.71	15.15
P-20%C	1	1.02	839.91	3.42	11.41	22.59
	2	1.08	835.96	3.39	10.69	19.62
P-30%C	1	1.09	n.c.	-	10.69	24.31
	2	1.11	837.23	3.40	10.31	20.10

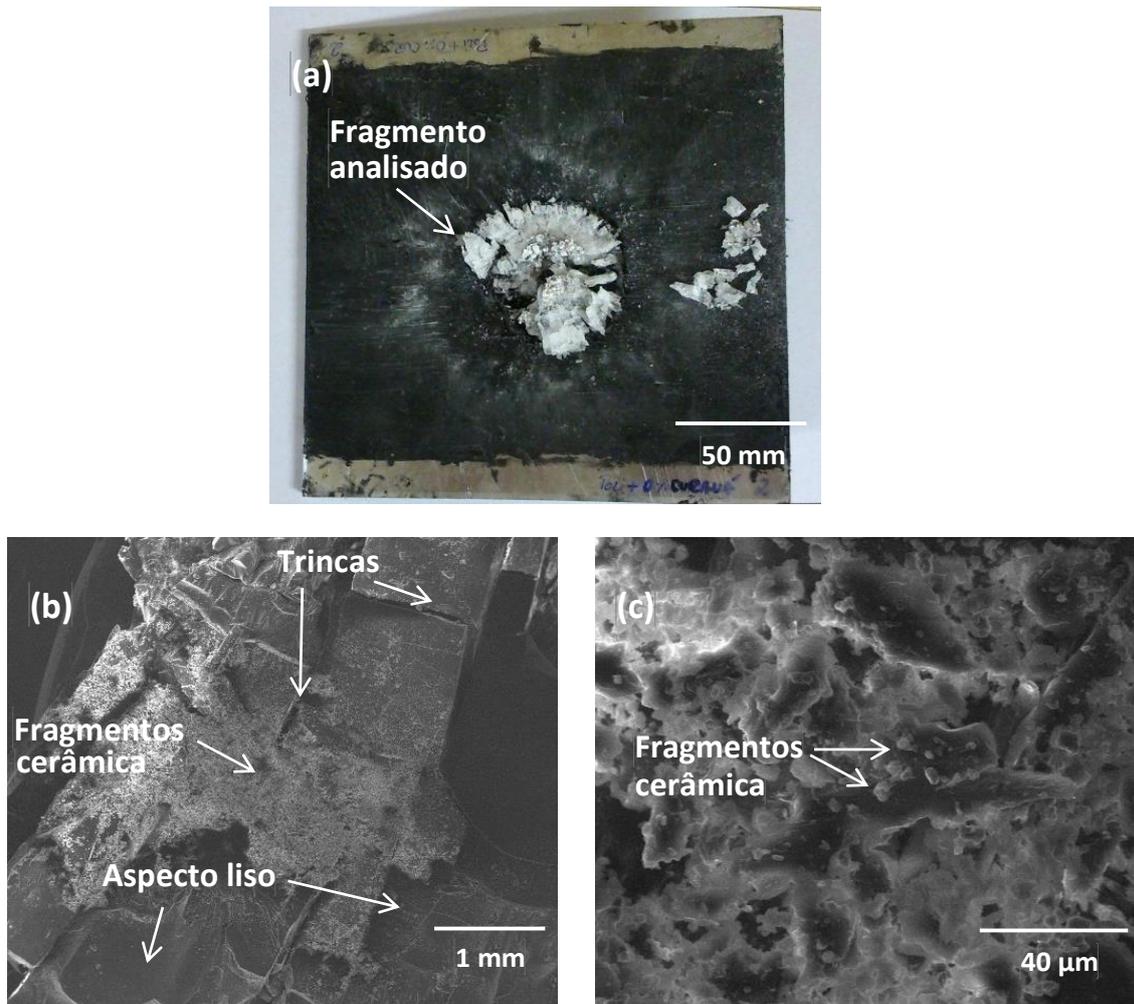
<sup>a</sup> n.c.: Não foi captado pelo Radar Doppler.

Observa-se que todos os valores de indentação característica ficaram abaixo dos 44 mm especificado pela NIJ-0101.4 para o nível III de proteção, ou seja, a blindagem atende a esta especificação. Da Silva, 2014b, realizou os mesmos testes para compósitos de matriz epoxídica reforçados com fibras de Curauá, obtendo também resultado satisfatório, com IC = 16,42 ± 3,85 mm para 30% de fibras e 19,89 ± 1,26 mm para 60% de fibras [6].

A adição das fibras de Curauá não alterou significativamente o peso do compósito, o que provavelmente teria ocorrido caso uma fibra sintética fosse utilizada, como vidro ( $\rho = 2.5$  g/cm<sup>3</sup>), carbono ( $\rho = 1.78$  g/cm<sup>3</sup>), ou aramida (1.44 g/cm<sup>3</sup>) [10]. Isto é uma vantagem para a utilização destes compósitos em blindagem pessoal.

Os valores de  $E_i$  foram próximos em todos os ensaios, ou seja, a energia cinética com que cada projétil atingiu a blindagem se manteve praticamente constante em todos os disparos. Desta forma, IC poderia ser utilizado como critério para comparação entre o desempenho dos compósitos. No entanto, a diferença de espessura dos corpos-de-prova e a dispersão dos valores de IC tornam necessário que mais amostras sejam testadas para que seja possível verificar o melhor teor de fibra.

A Figura 2a mostra o aspecto geral de um SBM que sofreu o impacto balístico, e cuja camada intermediária era o P-0%C. Observa-se que a resina poliéster se fragmentou por completo, e apenas uma fração de seus pedaços ficou aderida à placa metálica da blindagem. Um fragmento ao redor do ponto central foi recuperado e levado para observação no MEV. As Figuras 2b e 2c mostram o seu aspecto microscópico.

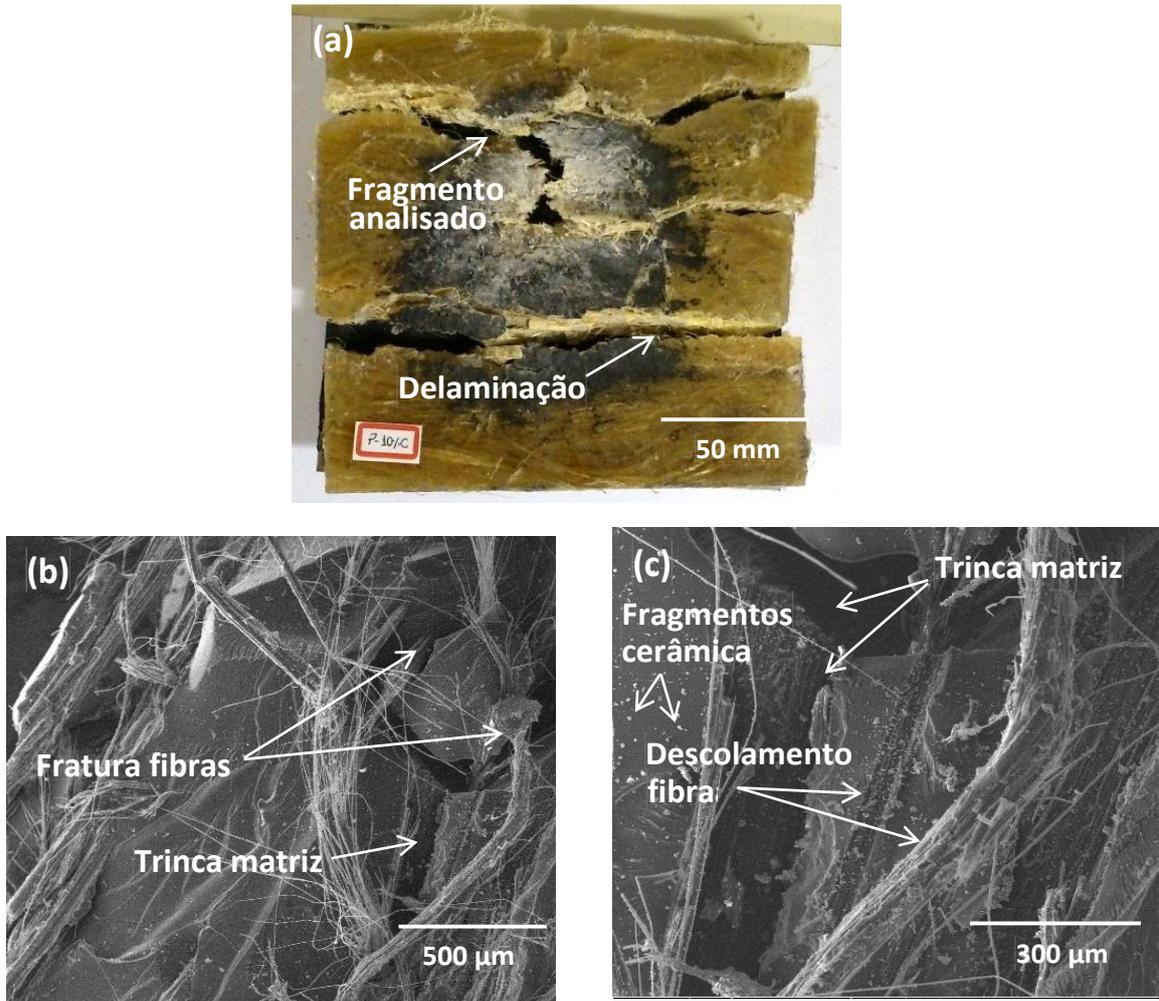


**Figura 2.** Aspecto do material da camada intermediária P-0%C: (a) Aspecto geral; (b) 60x; (c) 2000x.

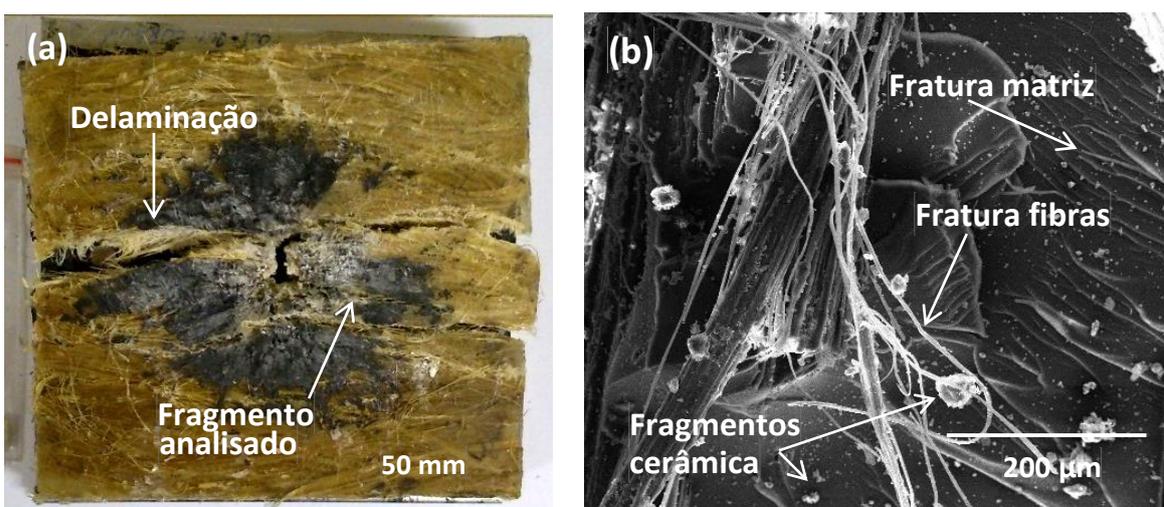
Pela Figura 2b pode ser observado que o poliéster exibe características de fratura frágil, que é relativamente lisa em pequenas ampliações e exibe grande quantidade de trincas. A Figura 2c destaca que a resina poliéster é responsável por coletar parte dos fragmentos do projétil e da cerâmica fraturada [5-7].

A Figura 3a mostra o aspecto geral de um SBM com o compósito P-10%C como camada intermediária. Observa-se que, ao contrário da resina pura, o compósito reforçado com fibras de Curauá se comportou como um corpo relativamente coeso, sem se fragmentar totalmente. Além disso, o conjunto das imagens, Figura 3a, 3b e 3c, mostra que o compósito utiliza a energia do projétil para sofrer a ruptura, em mecanismos como delaminação, trincamento da matriz, fratura e descolamento das fibras [5-7]. Também se observam fragmentos do projétil e da cerâmica fraturada na superfície da matriz e da fibra.

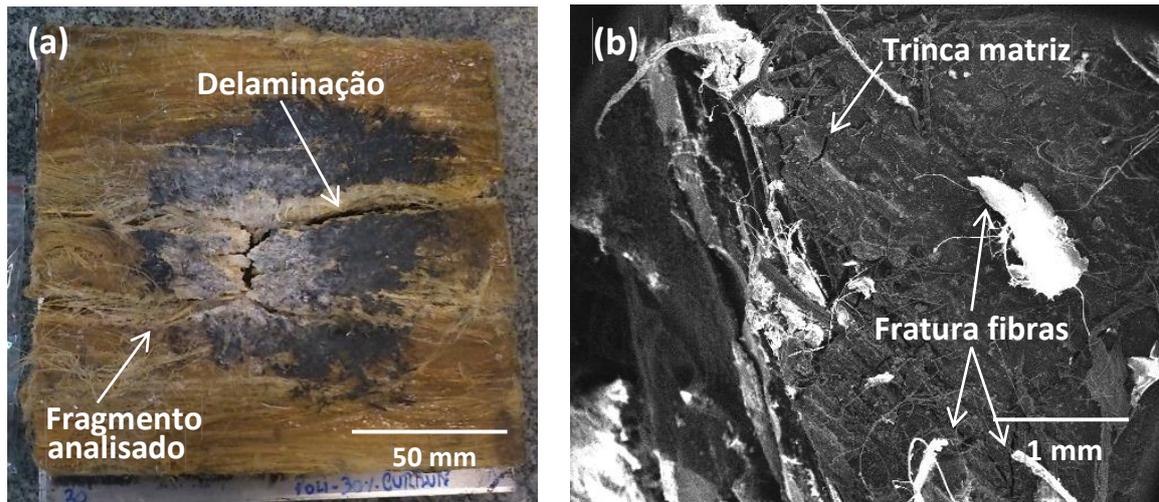
Os compósitos P-20%C (Figura 4) e P-30%C (Figura 5) apresentaram comportamento similar ao P-10%C, sofrendo a ruptura pelos mesmos mecanismos citados anteriormente.



**Figura 3.** Aspecto do material da camada intermediária P-10%C: (a) Aspecto geral; (b) 100x; (c) 300x.



**Figura 4.** Aspecto do material da camada intermediária P-20%C: (a) Aspecto geral; (b) 500x.



**Figura 5.** Aspecto do material da camada intermediária P-30%C: (a) Aspecto geral; (b) 65x.

#### 4 CONCLUSÃO

Por meio dos ensaios realizados, pode-se concluir que o poliéster reforçado com fibras de Curauá é uma alternativa promissora, em relação aos materiais atualmente utilizados, para atuar como camada intermediária em sistemas de blindagem multicamada, por apresentar bom desempenho balístico e baixo peso. No entanto, com os dados coletados ainda não é possível dizer qual a melhor fração de fibra a ser incorporada. A análise microscópica mostrou que as fibras de Curauá são responsáveis por manter a coesão do compósito após o impacto balístico, e por dissipar parte da energia do projétil por mecanismos como delaminação, trincamento da matriz, fratura e descolamento das fibras.

#### Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao CNPq pelo financiamento da pesquisa, através do processo 134268 de 2014-8, e ao CAEx pela execução dos ensaios balísticos.

#### REFERÊNCIAS

- 1 Junior, W.F.A.; Santos, M.A.; Bastian, F.L.; Suarez, J.C.M.; Cardoso, A.L.; Chaves, G.Q. Comportamento sob impacto balístico de um sistema compósito para blindagem. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*. 2006;1:12-18.
- 2 Da Silva, M.V.; Stainer, D.; Al-Qureshi, H.A.; Hotza, D. Blindagens Cerâmicas para Aplicações Balísticas: Uma Revisão. *Cerâmica*. 2014;60:323-331.
- 3 CHEESEMAN, B.A.; BOGETTI, T.A. Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates. *Composite Structures*. 2003;61:161-173.
- 4 Wang, L.; Kanesalingam, S.; Nayak, R.; Padhye, R. Recent trends in Ballistic Protection. *Textiles and Light Industrial Science and Technology (TLIST)*. 2014;3:37-47.
- 5 Wambua, P.; Vangrimde, B.; Lomov, S.; Verpoest, I. The Response of Natural Fibre Composites to Ballistic Impact by Fragment Simulating Projectiles. *Composite Structures*. 2007;77:232-240..
- 6 Da Silva, L.C. Comportamento Balístico de Compósitos Epóxi-Fibra Natural em Blindagem Multicamada. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2014b.



- 7 Da Luz, F.S. Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamada dom Compósito de Epóxi Reforçado com Fibra de Juta. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2014.
- 8 ABNT NBR 15000. Blindagens para impactos balísticos - classificação e critérios de avaliação. 2005.
- 9 NIJ Standards-0101.06. Ballistic Resistance of Body Armor. U.S. Department of Justice/Office of Justice Programs - National Institute of Justice. 2000.
- 10 Monteiro, S.N.; Lopes, F.P.D.; Barbosa, A.P.B.; Bevitori, A.B.; Da Silva, I.L.A.; Da Costa, L.L. Natural Lignocelulosic Fibers as Engineering Materials – An Overview. Metallurgical and Materials Transactions A. 2011;42:2963-2974.