

DESEMPENHO DO COMPÓSITO DE MATRIZ POLIÉSTER REFORÇADO COM FIBRA DE FIQUE EM UM SISTEMA DE BLINDAGEM MULTICAMADA *

Artur Camposo Pereira¹
Sergio Neves Monteiro²
Foluke Salgado de Assis³
Fábio da Costa Garcia Filho⁴
Raphael Henrique Moraes Reis⁵

Resumo

O desempenho balístico de compósitos de matriz de poliéster reforçados com fibras de fique foi investigado como segunda camada em um sistema de blindagem de múltiplas camadas (multilayered armor system - MAS). Frações de volume de fibras de fique, até 30 vol%, foram misturadas com poliéster para fabricar compósitos laminados. Os testes balísticos foram realizados com munição de alta velocidade de 7,62 mm. A profundidade de penetração causada pelo projétil em um bloco de plastilina, simulando um corpo humano, foi usada para avaliar o desempenho balístico de acordo com o padrão internacional NIJ 0101.06. Os materiais fraturados após os testes foram analisados por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados indicaram que os compósitos de fibra de fique apresentam um desempenho semelhante ao KevlarTM, que é um laminado de tecido de aramida, como segunda camada com a mesma espessura. São discutidos o mecanismo deste comportamento balístico, bem como as vantagens comparativas dos compósitos de fibra de fique sobre o KevlarTM.

Palavras-chave: fibra de fique; compósito poliéster; blindagem multicamada; desempenho balístico; vantagens econômicas.

PERFORMANCE OF FIQUE FIBER REINFORCED POLYESTER MATRIX COMPOSITE IN MULTILAYERED BALLISTIC

Abstract

The ballistic performance of fique fiber reinforced polyester matrix composites was investigated as second layer in a multilayered armor system (MAS). Volume fractions of fique fiber, up to 30 vol%, were mixed with orthophthalic polyester to fabricate laminate composites. Ballistic tests were conducted using high velocity 7.62 mm ammunition. The depth of penetration caused by the bullet in a block of clay witness, simulating a human body, was used to evaluate the ballistic performance according to international standard NIJ 0101.06. The fractured materials after tests were analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The results indicated that fique fiber composites present a performance similar to that of the much stronger KevlarTM, which is an aramid fabric laminate, as second layer with same thickness. The mechanism of this similar ballistic behavior as well as the comparative advantages of the jute fabric composites over the KevlarTM are discussed.

Keywords: fique fiber; polyester composite; multilayered armor; ballistic performance; economical advantage.

¹ Engenheiro Metalúrgico, mestre em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.

- ² *Engenheiro Metalúrgico, PhD em Materials Science AndEngineering, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.*
- ³ *Engenheiro Metalúrgico, mestre em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil..*
- ⁴ *Engenheiro Metalúrgico, mestrando em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.*
- ⁵ *Engenheiro Metalúrgico, mestrando em Ciências dos Materiais, 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 (MAS) 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].

A eficiência da segunda camada envolve uma interação complexa com a onda de choque e fragmentos provenientes do impacto inicial da frente de bala. De fato, a onda de choque compressiva gerada por impacto se propaga dentro da MAS e é parcialmente refletida em cada interface [3,10]. A densidade dos materiais da MAS afeta a eficiência da absorção de energia. A Figura 1, adaptada de Meyers [10], mostra um diagrama esquemático da variação da pressão (P) com a velocidade da partícula (U_p), após o impacto de um projétil contra uma cerâmica frontal da MAS. As curvas na Fig. 1(b) revelam como a pressão inicial da onda de choque compressivo em t_0 é afetada por uma segunda camada gerando uma onda refletida em t_4 , que viaja de volta para a camada frontal. No caso de a segunda camada ter uma densidade menor, então o pulso refletido em t_5 torna-se uma onda de choque de tração, que divide sua energia com a menor onda compressiva se movendo à frente. Dentro da primeira camada, a onda de tração refletida de volta contribui eficientemente para quebrar uma cerâmica frágil, que pode ser mais facilmente quebrada por uma pressão de tração [11].

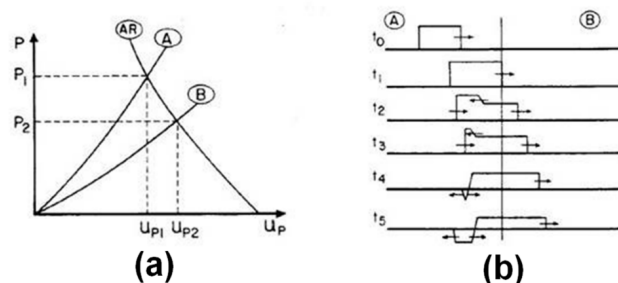


Figura 1. Transmissão de onda de choque de um meio com alto para outro com baixa densidade: (a) gráficos de velocidade de pressão-partícula; (b) perfis de tensão.

Baseado no comportamento dinâmico acima mencionado de uma MAS submetido a um impacto balístico, materiais mais leves foram selecionados como segunda

camada. Em particular, o Kevlar™ é hoje uma opção comum. 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 [12-19] para substituir compostos de fibra sintética. Aplicações bem-sucedidas de compósitos de fibras naturais estão ocorrendo principalmente na indústria automotiva [20-22]. Outro setor aplicado onde os compósitos naturais estão sendo investigados recentemente são as armaduras balísticas [23-32]. 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 [26-32].

No presente trabalho foi estudado o desempenho balístico da MAS, esquematicamente ilustrado na Figura 2, utilizando como segunda camada compósitos de poliéster reforçados com 10, 20 e 30% em volume de fibra de fique. A integridade dos compostos e as impedâncias das ondas de choque são avaliadas.

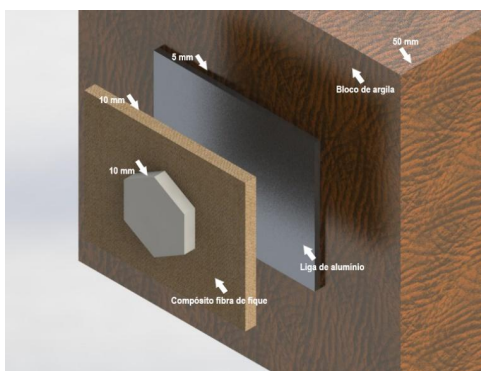


Figura 2. Representação esquemática da blindagem multicamadas investigada colocada à frente de um bloco de plastilina.

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 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 $80^\circ C$ 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 60 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 $12,8 \times 15 \times 1$ cm, de matriz de poliéster reforçado com fibras de fique orientadas e alinhadas, consistiu na prensagem em uma matriz metálica sob pressão de cinco toneladas, pelo período de vinte e quatro horas - tempo de cura - adotando a proporção de 10, 20 e 30% em volume de fibra de fique. Para a preparação da resina de poliéster (em estado líquido) foi adicionado, na proporção de 1% em peso, o catalisador peróxido metil-etil-cetona.

A preparação dos corpos de prova multicamada foi realizada por meio da colagem das camadas de alumínio, 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.

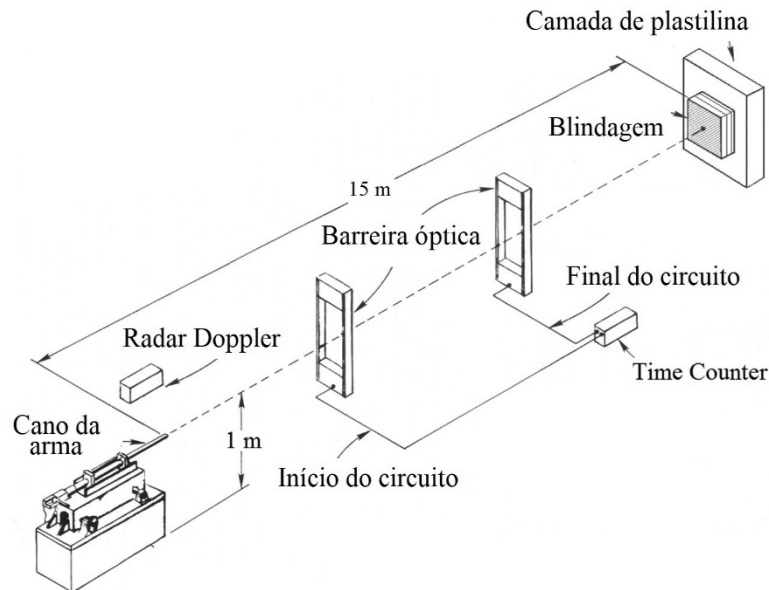


Figura 3. Esquema do sistema utilizado para os ensaios balísticos.

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 comprovete de calibre 7,62 dotado de mira laser e um dispositivo de fixação do alvo; uma distância do alvo de 15 metros, conforme previsto na norma ABNT NBR 15000 para as munições 7,62 x 51 mm; um ângulo de incidência no alvo de 90°; local 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.

Com o objetivo de identificar os modos de falha dos materiais da blindagem multicamada, foi realizada avaliação microscópica dos fragmentos com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (FEI Quanta FEG 250), utilizando elétrons secundários, voltagem de aceleração de 20 kV. Para os cálculos da pressão de choque e velocidade de partícula na interface dos materiais do sistema de blindagem foram utilizadas equações de conservação de momento de Rankine-Hugoniot e Estado do Material.

$$1) \text{ Momento: } (\rho - \rho_0) = \rho_0 \frac{v - v_0}{c} \quad (1)$$

$$2) \text{ Estado do Material: } U_s = C_0 + S_1 U_p \quad (2)$$

Onde: velocidade da partícula (U_p), velocidade de choque (U_s), densidade (ρ), pressão (P), velocidade do som do material a pressão igual a zero (C_0), S é um parâmetro empírico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros característicos dos materiais utilizados na densidade dos materiais da MAS que afeta na eficiência da absorção de energia são mostrados nas Tabelas 1 e 2. Não foi possível obter, na literatura, os parâmetros específicos para o compósito poliéster-fique, então, foi utilizada a velocidade da onda elástica (C_0), no lugar da velocidade de onda de choque (U_s). Para a resina poliéster e para fibra de juta, foram encontrados, na literatura, valores mínimos e máximos referente ao módulo de elasticidade [16].

Tabela 1. Valores da velocidade da onda de choque e dos parâmetros característicos de cada material.

Material	ρ (kg/m ³)	C (m/s)	S	U_s (m/s)	Referência
Chumbo	11300	2066	1,517	$2066 + 1,517U_p$	[10]
Aramida	1440	1180	2,420	$1180 + 2,420U_p$	[10]
Alumínio	2700	5328	1,338	$5328 + 1,338U_p$	[10]
Alumina	3530			10375,39	[16]

Tabela 2. Valores do módulo de elasticidade e da onda elástica do compósito poliéster-fique.

Material	ρ (g/cm ³)	$E_{\min.}$ (GPa)	$E_{\max.}$ (GPa)	C_0 (mín.) (m/s)	C_0 (máx.) (m/s)
Juta	1,30	13,00	27,00	-	-
Poliéster	1,10	2,06	4,46	-	-
Compósito Poliéster-Fique (30%)	1,06	2,00	6,00	1428,98	2210,66
Compósito Poliéster-Fique (20%)	1,08	2,00	6,00	1377,06	2092,31
Compósito Poliéster-Fique (10%)	1,09	2,00	6,00	1372,74	2047,37

O gráfico do método de casamento de impedância é mostrado na Figura 4 analisando a interação das ondas de choque em cada interface do sistema de blindagem multicamada. Neste gráfico foi utilizado o sistema de blindagem multicamada utilizando como camada intermediária o compósito de matriz poliéster reforçado com 30% de fibras de fique. A resolução dos cálculos nas interfaces pode ser resumida em três etapas: interface projétil (chumbo)/alumina; interface alumina/compósito; e interface compósito/alumínio, sendo utilizadas as equações (1) e (2). Também foram consideradas as interfaces alumina/aramida e aramida/alumínio para fins comparativos. A velocidade de projétil adotada 863,63.

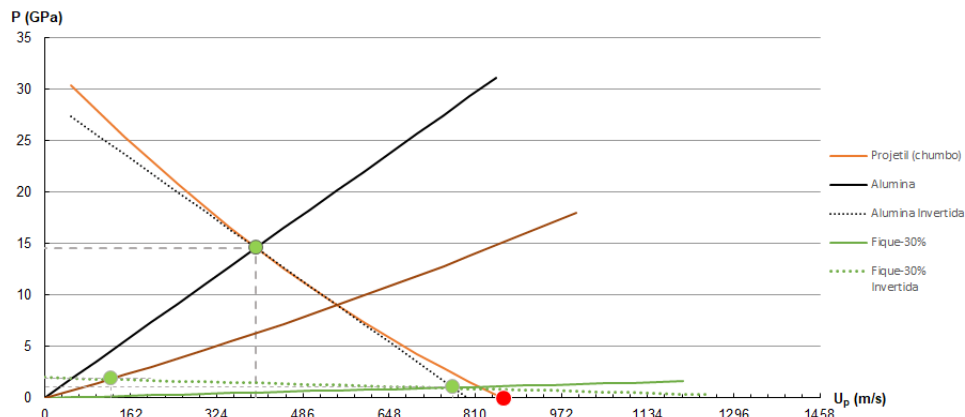


Figura 4. gráfico pressão versus velocidade de partícula para a blindagem multicamada.

Os valores encontrados para interação das ondas de choque, nas interfaces dos sistemas de blindagem multicamada, estudada neste trabalho, utilizando o método de casamento de impedância, são mostrados na Tabela 3. Na interface alumina/compósito e alumina/aramida a onda refletida é de natureza trativa, pois a alumina possui uma impedância maior que os materiais utilizados como segunda camada (tanto compósito quanto aramida), ocasionando o seu estilhaçamento, como previsto pelo método do casamento de impedâncias [10].

Tabela 3. Valores da velocidade de partícula, velocidade de onda de choque e pressão nas interfaces de cada componente da blindagem multicamada e a natureza da onda de choque.

Interfaces	Up (m/s)	Pressão (Gpa)	Us (m/s)	Natureza da onda de choque
Chumbo/Alumina	398,14	14,58	10375,35	Compressiva
Alumina/Poliéster-Fique(10%)	Mín. 764,62	1,16	1372,74	Trativa
	Máx. 749,96	1,67	2047,37	Trativa
Poliéster-Fique(10%) /Alumínio	Mín. 141,32	2,11	5517,09	Compressiva
	Máx. 195,52	2,95	5589,61	Compressiva
Alumina/Poliéster-Fique(20%)	Mín. 764,39	1,17	1377,06	Trativa
	Máx. 748,81	1,74	2092,31	Trativa
Poliéster-Fique(20%) /Alumínio	Mín. 142,5	2,12	5518,67	Compressiva
	Máx. 199,5	3,01	5594,93	Compressiva
Alumina/Poliéster-Fique(30%)	Mín. 768,44	1,02	1428,986	Trativa
	Máx. 754,02	1,55	2210,66	Trativa
Poliéster-Fique(30%) /Alumínio	Mín. 126,12	1,87	5496,75	Compressiva
	Máx. 181,09	2,72	5570,30	Compressiva
Alumina/Aramida	714,55	2,99	2909,21	Trativa
Aramida/Alumínio	365,84	5,75	5817,49	Compressiva

Os resultados obtidos no ensaio balístico são mostrados na Tabela 4, destacando-se os diferentes materiais utilizados como camada intermediária.

Tabela 4. Médias dos valores obtidos nos ensaios balísticos (colocar os seus valores).

Camada Intermediária	Espessura Média (mm)	ρ média (g/cm^3)	Indentaçã o média (mm)	Velocidade de Impacto Média (m/s)	Energia de Impacto Média (kJ)	Referências
Poliéster-Fique (10%)	11,56	10,6	17,80	840,25		*PT

Poliéster-Fique (20%)	11,85	10,8	17,10	842,35		*PT
Poliéster-Fique (30%)	11,65	10,9	17,90	848,32		*PT
Epóxi-sisal (30%)	11,73	1,14	16,03	827,95	3,32	[34]
Epóxi-Juta (30%)	11,42	1,17	20,67	833,81	3,37	[36]
Aramida	10	1,40	22,67	836,81	3,41	[36]

*Presente trabalho

As impedâncias de choque de cada componente da blindagem multicamada são mostradas na Tabela 5. De acordo com os resultados expressos nessa tabela, a aramida exibiu o maior valor de impedância de choque dentre os materiais utilizados como camada intermediária. Esse valor justifica a menor redução de energia de impacto, verificada pela maior profundidade média de indentação (17,50 mm) obtida em trabalhos anteriores, pois, em princípio, para uma maior impedância de choque da camada intermediária, maior a energia do pulso de compressão transmitida [8].

Tabela 5. Valores da Impedância de choque dos componentes da blindagem multicamada.

Material	Densidade (kg/m ³)	Velocidade de onda (m/s)	Impedância (kg/(m ² .s))	Referência
Poliéster-fique(10%) (mín.)	1060	1372,74	1,46 x 10 ⁶	*PT
Poliéster-fique(10%) (máx.)	1060	2047,37	2,17 x 10 ⁶	*PT
Poliéster-fique(20%) (mín.)	1080	1377,06	1,48 x 10 ⁶	*PT
Poliéster-fique(20%) (máx.)	1080	2092,31	2,26 x 10 ⁶	*PT
Poliéster-fique(30%) (mín.)	1090	1428,99	1,56 x 10 ⁶	*PT
Poliéster-fique(30%) (máx.)	1090	2210,66	2,41 x 10 ⁶	*PT
Chumbo	11300	2.066,00	23,35 x 10 ⁶	*PT
Alumínio	2700	5.817,49	15,85 x 10 ⁶	*PT
Aramida	1440	2.909,21	4,19 x 10 ⁶	*PT
Epóxi-juta (mín.)	1167	2.188,03	2,55 x 10 ⁶	[36]
Epóxi-juta (máx.)	1167	2.895,94	3,38 x 10 ⁶	[36]
Epóxi-sisal (mín.)	1155	1.948,91	2,25 x 10 ⁶	[34]
Epóxi-sisal (máx.)	1155	2.955,22	3,41 x 10 ⁶	[34]
Alumina	3530	10.375,39	36,62 x 10 ⁶	[35]

*Presente trabalho

Na figura 5 são mostradas as imagens obtidas através do MEV do compósito poliéster-fique após a realização do ensaio balístico.

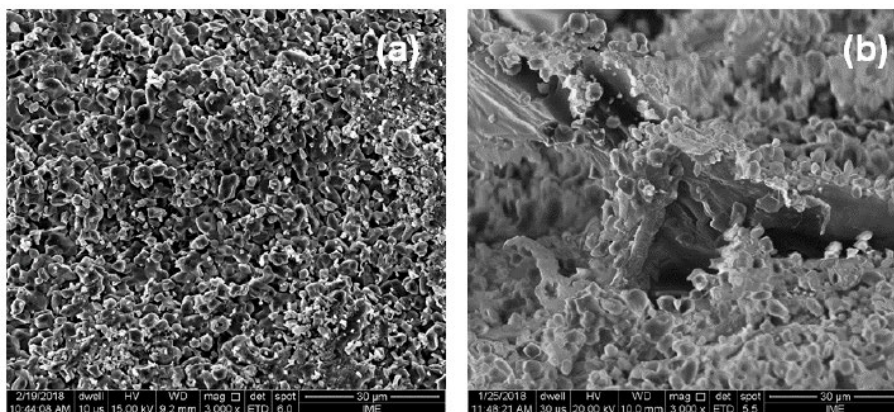


Figura 5. (a) Superfície de fratura de uma partícula da cerâmica após o teste balístico e (b) superfície de fratura de compósito de 20 vol% fibra de fique coberta com fragmentos cerâmicos.

A Fig. 5(a) mostra a superfície esperada de fratura fracamente cristalina de uma partícula de cerâmica recolhida, que obteve fragmentos microscópicos associados aos grãos. Como indicado por Medvedovski [33], um projétil de 7,62 mm faz com que diferentes tipos de rachaduras sejam formados durante o impacto. A Fig. 5(b) mostra a capacidade da segunda camada compósita de tecido de 20 vol%, na MAS com uma frente cerâmica, para recolher fragmentos gerados a partir do impacto balístico. Esta capacidade não requer fibras mais fortes, mas mecanismos de incrustação mecânica, bem como atração de fragmentos pelas forças de Van der Waals e cargas estáticas na superfície da fibra, de compósitos sintéticos de Kevlar™ ou de fibras naturais [28–32].

4 CONCLUSÃO

Os compósitos de matriz poliéster reforçada com fibra de fique utilizados como camada intermediária do sistema de blindagem multicamada atenderam as especificações da norma internacional NIJ 0101.06, ou seja, a profundidade de indentação foi menor que 44 milímetros. Esse sistema de blindagem apresentou uma menor profundidade de indentação média (17 mm) em comparação a sistema de blindagem utilizando tecido de Kevlar™ (21 mm).

Com auxílio das micrografias obtidas pelo MEV, foi possível observar que os compósitos (poliéster-fique) ensaiados tiveram suas superfícies recobertas por partículas cerâmicas, contribuindo pela dissipação de energia cinética através do mecanismo de incrustação mecânica.

Dentre os materiais utilizados como camada intermediária o tecido de aramida exibiu maior impedância, $4,19 \times 10^6$ kg/m²s, enquanto o poliéster/fique obteve valores de até $1,46 \times 10^6$ kg/m²s. Esse valor menos elevado para o compósito poliéster/fique justifica a maior redução de energia de impacto, e conseqüentemente maior eficiência balística da blindagem multicamada que utiliza o tecido de aramida como camada intermediária.

Agradecimentos

A CAPES pelo incentivo financeiro.

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. Meyers, M.A. *Dynamic Behavior of Materials*, 1st ed., New York, USA: Wiley; 1994. pp. 183.
11. Louro, L.H.L.; Meyers, M.A. Effect of stress state and microstructural parameters on impact damage of alumina-based ceramics. *J. Mater. Sci.* 1989, 24(7), 2516-2532.
12. 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.
13. Netravali, A.N.; Chabba, S. Composites get greener. *Mater. Today* 2003, 6(4), 22-29.
14. Crocker, J. Natural materials innovative natural composites. *Mater. Technol.* 2008, 23(3), 174-178.
15. John, M.J.; Thomas, S. Biofibers and biocomposites. *Carbohydr. Polym.* 2008, 71(3), 343-364.
16. 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.
17. Faruk, O.; Bledzki, A.K.; Fink, H.P.; Sain, M. Biocomposites reinforced with natural fibers. *Progr. Polym. Sci.* 2012, 37(11), 1555-1596.
18. 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.
19. 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.
20. Holbery, J.; Houston, D. Natural fiber reinforced polymer composites in automotive applications. *JOM* 2006, 58(11), 80-86.

21. 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.
22. Thomas, S.; Paul, S.A.; Pothan, L.A.; Deepa, B. Natural fibers: Structure, properties and 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
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. 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>.
30. 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.
31. 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.
32. 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).
33. Medvedovski, E. Ballistic performance of armor ceramics: Influence of design and structure. Part 2. *Ceram. Int.* 2010, 36, 2117-2127.
34. ARAÚJO, B.M. Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamada com Compósito de Epóxi Reforçado com Fibra de Sisal. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015.
35. 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.
36. DA LUZ, F.S. Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamada do 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.