

EFICIÊNCIA BALÍSTICA DE SISTEMAS DE BLINDAGEM MULTICAMADA COM COMPÓSITOS DE POLIÉSTER REFORÇADO COM FIBRAS DE SISAL

L. T. Bolzan, F. de O. Braga¹, S. N. Monteiro, F. J. H. T. V. Ramos
Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais (SE/4), Instituto Militar de
Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

¹fabio_obraga@yahoo.com.br

RESUMO

A violência e os muitos conflitos armados tornam necessários sistemas de proteção eficientes. Os sistemas de blindagem multicamada (SBMs) são soluções que promovem segurança fazendo uso de materiais leves e eficientes. Eles podem ser constituídos por três camadas: uma cerâmica frontal, seguida de um compósito e um metal dúctil. Compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais têm se mostrado eficientes para compor a segunda camada, além de serem leves, de baixo custo e ambientalmente corretos. Este trabalho avalia SBMs utilizando compósitos poliéster reforçado com 10, 20 e 30% vol. de fibras de sisal como segunda camada. Os ensaios balísticos foram realizados com munição de calibre 7,62x51 mm seguindo critérios da norma NIJ 0101.06. Os SBMs se mostraram igualmente eficientes, e uma possível explicação está na capacidade similar que os diferentes tipos de compósito possuem em reter fragmentos provenientes da interação do projétil com a cerâmica, independentemente da porcentagem de sisal.

Palavras-chave: compósitos reforçados com fibras naturais, fibra de sisal, blindagem multicamada, balística.

INTRODUÇÃO

A violência e os conflitos armados demandam eficientes sistemas de proteção pessoal. Para munições de alto calibre, como o 7,62 mm, um único material pode não ser suficiente para barrar o projétil e/ou prevenir um trauma letal ao usuário da

blindagem. Para este tipo de armamento, soluções leves e eficientes têm sido pesquisadas e desenvolvidas, como os sistemas de blindagem multicamada (SBMs). Estes sistemas podem ser utilizados como proteção balística em várias aplicações, como em coletes pessoais, veículos, aeronaves e grandes estruturas⁽¹⁻²⁾.

A camada frontal de um SBM é comumente de material cerâmico. Este tem a capacidade de erodir e deformar a ponta do projétil, e sua fragmentação é eficiente na dissipação da energia cinética do projétil⁽¹⁻⁴⁾. Como segunda camada são utilizados compósitos ou tecidos como Kevlar®, cuja função principal é absorver uma parcela de energia através da captura dos fragmentos (cerâmicos e do projétil)⁽²⁻⁴⁾. Uma terceira camada de metal leve e dúctil pode ser considerada⁽¹⁾.

A segunda camada merece atenção especial. Quanto menor sua densidade, menor será a intensidade da onda de compressão que atinge o usuário da blindagem, proporcionando maior segurança. A parcela de onda que é refletida na interface entre os materiais, neste caso, provoca a fragmentação da cerâmica, potencializando a dissipação de energia. Compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais são boa alternativa, pois possuem boa resistência, baixa densidade e consequente bom desempenho. Além disso, são de baixo custo e ambientalmente corretas⁽⁵⁾. Vários trabalhos têm sido publicados com a finalidade de investigar comportamento destes compósitos como integrantes de SBMs⁽⁶⁻⁸⁾. Entre as fibras naturais, o sisal apresenta boas propriedades, como alta resistência e alto módulo elástico, e a aplicação de seus compósitos em SBMs é promissora. Até hoje, nenhum trabalho foi dedicado ao estudo do comportamento dos compósitos de matriz poliéster reforçados com sisal em SBMs, e ao estudo do melhor teor de fibras a ser adicionado. Portanto, neste trabalho, buscou-se investigar o comportamento de compósitos de poliéster reforçados com 10, 20 e 30% de sisal em SBMs com camada frontal cerâmica, e camada posterior de liga de alumínio.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os SBMs investigados neste trabalho possuem a seguinte configuração: camada frontal de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-4\%Nb}_2\text{O}_5$, na forma de hexágono regular (30 mm de aresta e 10 mm de espessura); camada intermediária de compósito poliéster reforçado com 10, 20 e 30% de fibras de sisal, na forma retangular (120x150x10 mm); camada

posterior de liga de alumínio 5052 H34, na forma retangular (120x150x5 mm). As camadas foram unidas com auxílio de um adesivo de poliuretano da marca Ultraflex.

Os pós de Al_2O_3 (fornecido por Treibacher Schleifmittel) e Nb_2O_5 (fornecido por CBMM) foram misturados na proporção (4% em peso), moídos, peneirados, prensados a frio e sinterizados a $1400^\circ C$ por 3 h. A resina poliéster (fornecida por Resinpoxy) foi misturada ao endurecedor na proporção de 1% em peso, e também às fibras (fornecidas por Sisalsul) previamente limpas e secas (2h, $60^\circ C$), em uma matriz de aço, buscando manter as fibras alinhadas em uma única direção. A mistura foi mantida sob pressão de 3 MPa até a cura ($25^\circ C$, 24h). A placa de alumínio com 5 mm de espessura foi fornecida pela empresa Metalak.

Os ensaios balísticos foram realizados no Centro de Avaliações do Exército (CAEx), Rio de Janeiro, com base em procedimentos da Norma NIJ 0101.06 (2008). As amostras foram posicionadas na frente de um bloco de massa a base de óleo, que simula a consistência do corpo humano. Após o impacto balístico, foi medida a profundidade da deformação causada no bloco, que segundo a NIJ 0101.06, deve ter no máximo 44 mm para o que o SBM possa ser considerado eficiente. A Fig. 1a ilustra um SBM fixado no bloco de massa, e a Fig. 1b mostra o trauma causado após o impacto. Foram realizados 10 ensaios de cada grupo e os valores foram tratados segundo o método estatístico de Weibull. Após os ensaios, fragmentos dos corpos de prova foram coletados para análise no microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta FEG 250, disponível no IME.

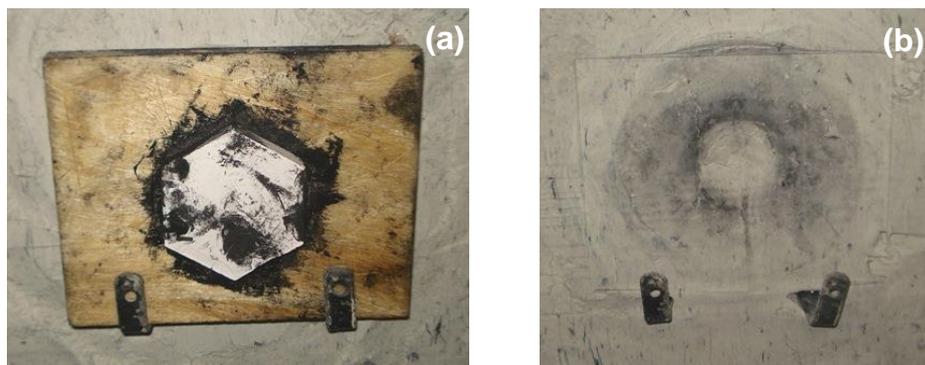


Fig. 1. Ensaio balístico: (a) SBM posicionado em frente ao bloco de massa; (b) Deformação causada no bloco de massa após o impacto balístico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores referentes às profundidades de deformação causadas no bloco de massa estão apresentados na Tab. 1. Observa-se que os SBMs foram eficientes com relação ao critério da NIJ 0101.06, pois a deformação no bloco não excedeu 44 mm, e o projétil não conseguiu perfurar os alvos. A parcela de energia não dissipada está intimamente ligada com o trauma provocado no bloco de massa (Fig. 1b).

Tab. 1. Profundidades médias das deformações causadas no bloco de massa após o impacto balístico.

Camada intermediária	Profundidade média (mm)
Poliéster-Sisal - 30% Fibras	21,7 ± 3,1
Poliéster-Sisal - 20% Fibras	25,9 ± 3,7
Poliéster-Sisal - 10% Fibras	25,9 ± 2,1

Considerando os desvios-padrão, os valores apresentados na Tab. 1 foram muito próximos, indicando que os diferentes SBMs possuem eficiência balística semelhante. Isto pode estar relacionado com a capacidade que os diferentes compósitos possuem de reter os fragmentos da cerâmica e do projétil, pois é um mecanismo relacionado tanto à matriz polimérica quanto às fibras. A Fig. 2a ilustra a retenção de pequenas partículas cerâmicas pela fibrila de sisal, enquanto a Fig. 2b mostra este fenômeno na matriz poliéster.

A delaminação parece ser um dos principais mecanismos de fratura, pois foi observada na maioria dos ensaios, independentemente do teor de fibras. Consiste na separação das fases do compósito, que, juntamente com outros mecanismos como fratura frágil da matriz polimérica, rompimento das fibras e a separação das fibras em microfibrilas, tem papel fundamental na dissipação da energia cinética do projétil⁽⁸⁾. Este mecanismo está indicado da pela seta na Fig. 3a. No compósito com 10% de sisal, este mecanismo se manifestou de forma mais severa, ocorrendo a fragmentação em duas ou mais partes (como na Fig. 3b). Compósitos com 10% de sisal, apesar de apresentarem mesma profundidade de deformação que os outros, foram os únicos que perderam sua integridade após o impacto. Por este motivo, estes não foram considerados adequados para uso em SBMs.

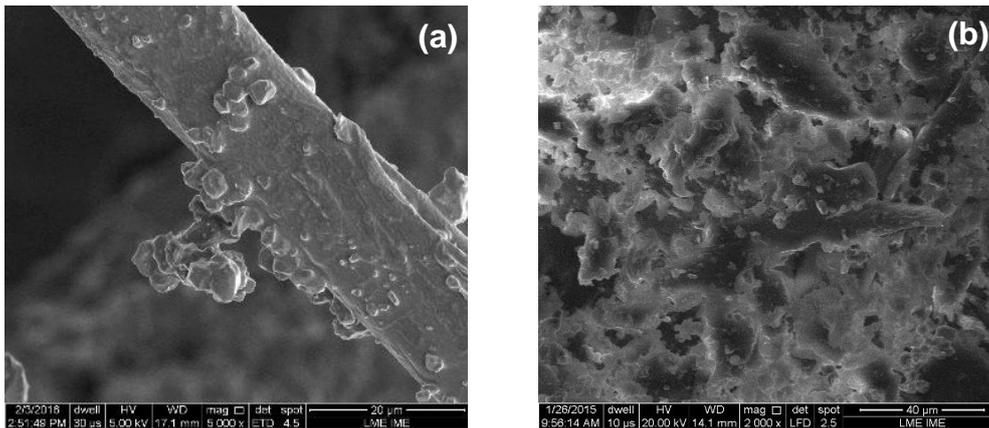


Fig. 2. Micrografias eletrônicas de fratura do compósito com 30%: (a) fibrila de sisal com fragmento empilhado (5.000x) e (b) matriz poliéster (2.000x).

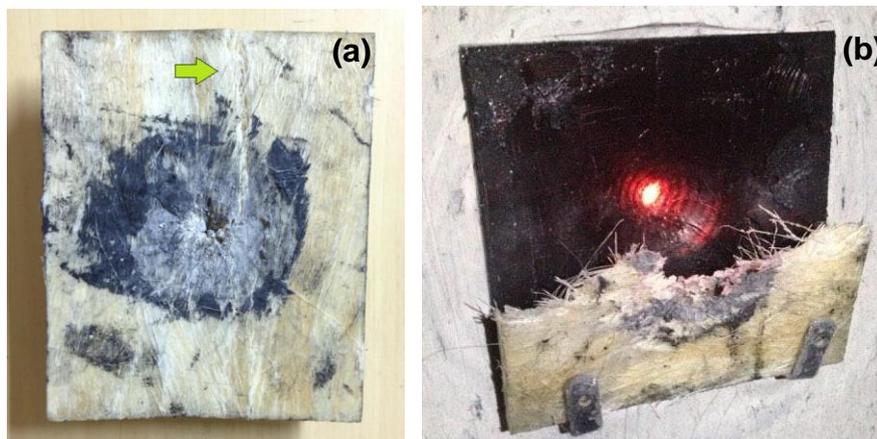


Fig. 4. Delaminação no compósito (a) com 30% de sisal e (b) com 10% de sisal.

Através do método estatístico de Weibull foi possível relacionar os resultados dos ensaios. As amostras de compósitos contendo 10% de sisal não foram consideradas neste tratamento. As Fig. 5a e Fig. 5b representam os gráficos da distribuição para as blindagens com 30 e 20% de sisal. A Tab. 2, por sua vez, fornece os parâmetros obtidos no tratamento dos dados. Em ambos os casos, os pontos apresentaram comportamento unimodal, ou seja, a relação os mesmos mecanismos estão presentes em cada amostra de mesmo grupo. Os ajustes à distribuição foram muito bons, pois o parâmetro R^2 se mostrou superior a 0,9. Os resultados da blindagem com 30% de sisal se mostraram mais homogêneos ($\beta=7,357$) que os resultados da blindagem com 20% ($\beta=6,969$). O parâmetro θ , por

sua vez, se mostrou mais elevado quando a porcentagem de sisal é de 20% (27,63), que está associada à profundidade de deformação que melhor caracteriza a amostra. Os resultados mostram que o desempenho do compósito de 30% é levemente superior ao de 20%.

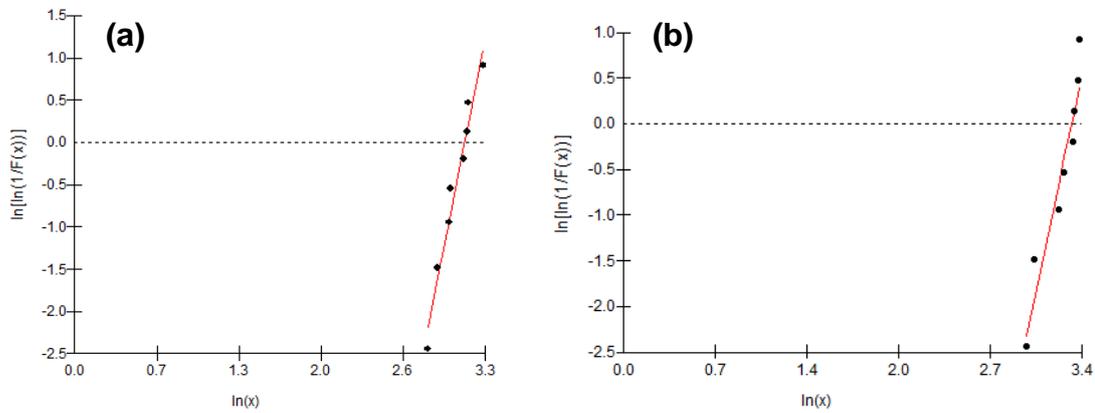


Fig. 6. Gráficos da distribuição de Weibull das profundidades de deformação (a) compósito 30% e (b) 20% de fibras de sisal.

Tab. 2. Parâmetros de Weibull para as profundidades de deformação.

Camada intermediária	Módulo de Weibull (β)	Unidade característica (θ)	Coefficiente de correlação (R^2)
30% Fibras	7,357	23,00	0,9642
20% Fibras	6,969	27,63	0,9199

CONCLUSÕES

Sistemas balísticos de blindagem multicamada, utilizando compósitos reforçados com 10, 20 e 30% de sisal como segunda camada, se mostraram igualmente eficientes na proteção contra munições de calibre 7,62x51 mm, com relação ao critério estabelecido pela norma NIJ 0101.06. Entretanto, a perda da integridade física do compósito com 10% de sisal faz com que este não seja adequado para utilização em blindagens multicamada. Foram identificados diferentes mecanismos de fratura dos compósitos, como falha da matriz, falha das fibras, separação das fibras em microfibrilas e delaminação. O fato dos diferentes

sistemas de blindagem se mostrarem igualmente eficientes pode estar relacionado com uma capacidade semelhante que os compósitos possuem de reter fragmentos resultantes do impacto do projétil com a primeira camada.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem o auxílio das agências brasileiras CAPES e CNPq, e ao CAEx, por viabilizar os ensaios balísticos.

REFERÊNCIAS

1. MEDVEDOVSKI, E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1. **Ceramics International**, v. 36, p. 2103-2115, 2010.
2. AKELLA, K.; NAIK, N.K. Composite armour – A review. **Journal of the Indian Institute of Science**, v. 95:3, p. 297-312, 2015.
3. SHOKRIEH, M. M.; JAVADPOUR, G. H. Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor. **Composite Structures**, v. 82, p. 269-276, 2008.
4. MONTEIRO, S.N.; LIMA JR., E.P.; LOURO, L.H.L.; SILVA, L.C.; DRELICH, J.W. Unlocking function of aramida fibers in multilayered ballistic armor. **Metallurgical and materials transactions A.**, v. 46, p. 37-40, 2014.
5. JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and Biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, v. 71, p. 343-364, 2008.
6. CRUZ, R. B.; JÚNIOR, E. P. L.; MONTEIRO, S. N.; LOURO, L. H. L. Giant Bamboo Fiber Reinforced Epoxy Composite in Multilayered Ballistic Armor. **Materials Research**, v. 18, p. 70-75, 2015.
7. LUZ, F. S.; JUNIOR, E. P. L.; LOURO, L. H. L.; MONTEIRO, S. N. Ballistic Test of Multilayered Armor with Intermediate Epoxy Composite Reinforced with Jute Fabric. **Materials Research**, v. 18, p. 170-177, 2015.
8. ROHEN, L. A.; MARGEM, F. M.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F.; DE ARAUJO, B. M.; LIMA, E. S. Ballistic Efficiency of an Individual Epoxy Composite Reinforced with Sisal Fibers in Multilayered Armor. **Materials Research**, v. 18, p. 55-62, 2015.

TITLE

BALLISTIC EFFICIENCY OF MULTILAYERED ARMOR SYSTEMS WITH SISAL FIBER POLYESTER COMPOSITES

ABSTRACT

The violence and the different types of armed conflicts demand efficient protective systems. The Multilayered Armor Systems (MAS) are solutions that provide safety by making use of light and efficient materials. The MAS can be composed of three layers: a front ceramic layer, a composite second layer, and a ductile metal back layer. Composites reinforced with natural fibers have proven themselves effective for the second layer, as well as light, low-cost and environmental friendly. The present work evaluates MAS using composites reinforced with 10, 20, and 30 vol.% sisal fibers. The ballistic tests were performed using 7.62x51 mm ammunition, following the NIJ 0101.06 standard criteria. The present MASs were equally efficient. The explanation might be the similar capacity of the different composites to retain the fragments generated by the interaction of the projectile with the frontal ceramics, independently of the percentage of sisal fibers.

Keywords: natural fiber composites, sisal fiber, multilayered armor, ballistics.