

DESEMPENHO BALÍSTICO DE UMA BLINDAGEM CERÂMICA MULTICAMADA COM MODIFICAÇÃO NA GEOMETRIA DE IMPACTO*

Fábio de Oliveira Braga^{1,2}
Fernanda Santos da Luz³
Sergio Neves Monteiro⁴
Luis Henrique Leme Louro⁵
Alaelson Vieira Gomes⁶
Édio Pereira Lima Jr.⁷

Resumo

Blindagens cerâmicas são frequentemente utilizadas para proteção contra projéteis de alta energia, como os de calibre 7,62 mm e 5,56 mm. Recentemente, foi demonstrado que a modificação da geometria da face de impacto, de plana para convexa, possibilita uma melhor distribuição das tensões geradas pela interação do projétil com o alvo. Este efeito provocaria um aumento na absorção de energia do projétil, proporcionando uma maior segurança ao usuário. No presente trabalho caracterizou-se uma blindagem com a face cerâmica convexa, por meio da metodologia da norma NIJ-0101.06 (2008), ou seja, pelo ensaio balístico com medição do trauma em um material de referência que simula a consistência do corpo humano. Este ensaio visa a aplicação do material em coletes balísticos. Foi observada uma melhora significativa no desempenho balístico após a modificação da geometria.

Palavras-chave: Ensaio balístico; Blindagem cerâmica; Sistemas de blindagem multicamada.

BALLISTIC PERFORMANCE OF A CERAMIC MULTILAYERED ARMOR WITH MODIFICATION IN THE IMPACT GEOMETRY

Abstract

Ceramic armors are frequently used for protection against high energy projectiles, such as the 7.62 mm and 5.56 mm. Recently, it has been demonstrated that a modification in the impact face geometry, from plane to convex, improves the distribution of stresses generated by the projectile-target interaction. This effect would raise the projectile's energy absorption, improving the user's safety. In the present work, the objective was to characterize an armor with convex impact face, by means of the NIJ-0101.06 (2008) standard methodology, in other words, by the ballistic test with trauma measurement in a reference material that simulates the consistency of the human body. This test aims an eventual application of the material in armor vests. It has been observed a significant improvement in the ballistic performance after the geometry modification.

Keywords: Ballistic test; Ceramic armor; Multilayered armor systems.

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@gmail.com.

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

³ Engenheira de Materiais, M.Sc., Candidata ao doutorado, 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

Materiais cerâmicos são largamente empregados em proteção balística do indivíduo (coletes) e de estruturas, como alternativa para reduzir o peso de blindagens. Estes integram os chamados Sistemas de Blindagem Multicamada (SBMs), atuando em conjunto com outros materiais para proteção contra projéteis de alta energia cinética como o 7,62 mm e o 5,56 mm [1-3].

A camada frontal cerâmica é de grande importância nos SBMs, pois tem a tarefa de fragmentar a ponta do projétil, distribuindo as tensões do impacto para uma área maior, além de absorver grande parte de sua energia na produção de superfícies de fratura [2,3-4]. A parcela da energia do projétil absorvida pelo cerâmico pode chegar a 50% do total, para o caso de munição 7,62 mm [5].

Em trabalho anterior, Monteiro *et al.* (2016) [6] estudaram uma cerâmica balística composta por Al_2O_3 dopada com 4% de Nb_2O_5 , de geometria plana ou convexa. Os autores mediram a energia cinética do projétil absorvida pela blindagem além de, em um teste distinto, medirem a profundidade de penetração do projétil em um bloco de alumínio posicionado na face posterior da blindagem. Estes resultados, em conjunto com simulações por elementos finitos, mostraram uma melhora de cerca de 16-18% no desempenho da blindagem, com a utilização da cerâmica de face convexa.

A melhora no desempenho balístico é atribuída à inclinação existente na superfície convexa. O impacto oblíquo tem sido estudado por diversos autores, que visam aproveitar as características geométricas das blindagens para projetar sistemas de proteção que permitam uma maior absorção da energia do projétil [8-11].

O objetivo do presente trabalho é caracterizar o comportamento de uma blindagem com a face cerâmica convexa quando submetida ao impacto com munição 7,62 mm. Foi utilizada a metodologia da norma NIJ-0101.06 (2008) [12], que padroniza o ensaio balístico com medição do trauma em um material de referência que simula a consistência do corpo humano.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A cerâmica utilizada no presente trabalho consiste de alumina (Al_2O_3) contendo 4% em peso de nióbia (Nb_2O_5). 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

A prensagem do cerâmico foi feita em matriz hexagonal, gerando uma peça de face plana, que é mostrada na Fig. 1a. Um molde feito em massa epóxi foi

adaptado para o interior da matriz, possibilitando a produção de peças convexas, como mostrado na Fig. 1b.



(a)



(b)

Figura 1. Peças cerâmicas utilizadas na camada frontal.

Para o ensaio balístico, a peça cerâmica foi integrada a um SBM como mostrado esquematicamente na Fig. 2. Este possui, além da camada cerâmica, uma camada intermediária de tecido de aramida e uma camada posterior de liga de alumínio 5052 H34.

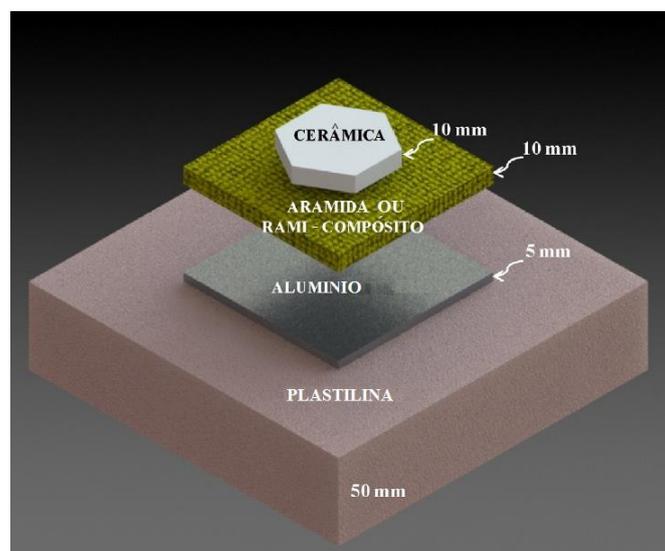


Figura 2. Esquema do sistema de blindagem multicamada do presente trabalho em frente ao bloco de material de referência (plastilina).

As placas de alumínio 5052 H34 foram fornecidas pela empresa Metalak Metais, 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).

O tecido de aramida (Fig. 3), 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.



Figura 3. Aspecto geral do tecido de aramida.

Os SBMs foram submetidos ao impacto balístico com projéteis tipo 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 4a), localizado a 15m do alvo (blindagem), conforme previsto na norma ABNT 15000 [13]. O disparo foi realizado na horizontal ($\theta=0^\circ$). A blindagem foi posicionada em frente a um bloco de plastilina (Figura 4b), com densidade de cerca de 1,7 g/cm³, para que a deformação na blindagem fosse medida pela indentação deixada na plastilina, material que simula a consistência do corpo humano. Esta indentação também é conhecida como “trauma”, pois simula o trauma real de um impacto no indivíduo. Esta metodologia é especificada pela norma NIJ-0101.06 [12]. A Figura 4 mostra os SBMs cerâmica plana (Fig. 5a) e convexa (Fig. 5b) fixados no bloco para o ensaio balístico.

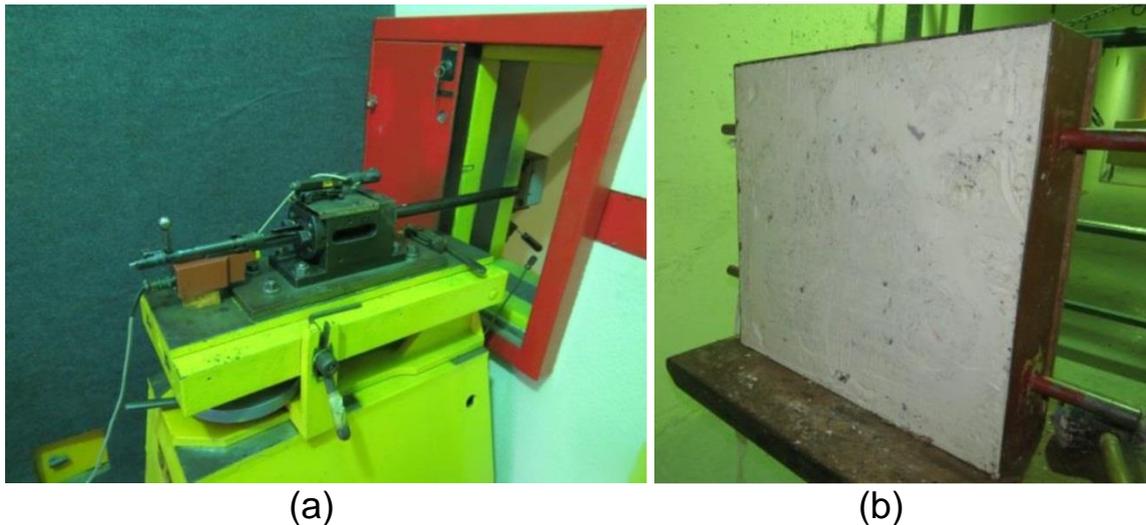


Figura 4. Ensaio balístico: (a) Provetete; (b) bloco de plastilina, no qual é fixado o alvo.



Figura 5. 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. Esta medição é especificada pela NIJ-0101.06 para garantir que não há grandes variações na energia incidente do projétil, mascarando o resultado.

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

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 velocidade de impacto (V_i) e trauma na plastilina para os SBMs com cerâmica plana [14] e convexa. 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 o trauma na plastilina, há superioridade do SBM com cerâmica convexa, havendo queda de 19% no valor (21 ± 3 para 17 ± 1 mm). É importante enfatizar que, quanto menor o trauma, melhor o desempenho, pois o usuário receberia um menor impacto. Esta superioridade da geometria convexa já foi demonstrada por Monteiro *et al.* (2016) através de outros métodos [7]. A melhora deve-se ao fato de a maior parte da superfície de impacto ser oblíqua em relação ao projétil, de forma que a energia de impacto é mais bem distribuída.

Tabela 3. Trauma medido na plastilina no ensaio balístico para as duas geometrias do cerâmico.

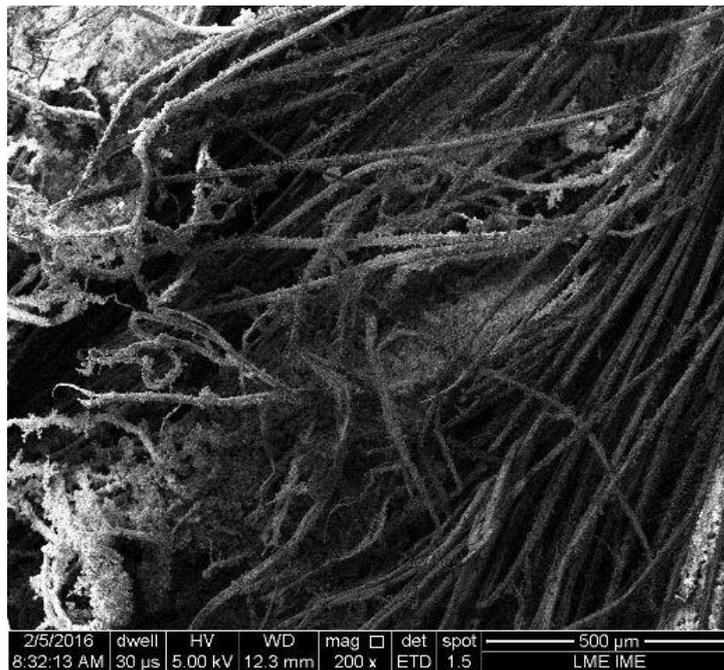
Geometria cerâmico	Velocidade de impacto (m/s)	Trauma (mm)		Referência
		Média	\pm	
Plana	-	Média	21 ± 3	Monteiro <i>et al.</i> , 2016a
Convexa	853,79		16,5	Presente trabalho
	846,10		16,3	
	844,20		18,3	
	Média	848 ± 5	Média	

O aspecto geral dos SBMs (Fig. 6) apresentou bastante similaridade, com fragmentação total do cerâmico e penetração parcial do projétil na camada de aramida. O projétil, assim como o cerâmico, foi totalmente fragmentado.

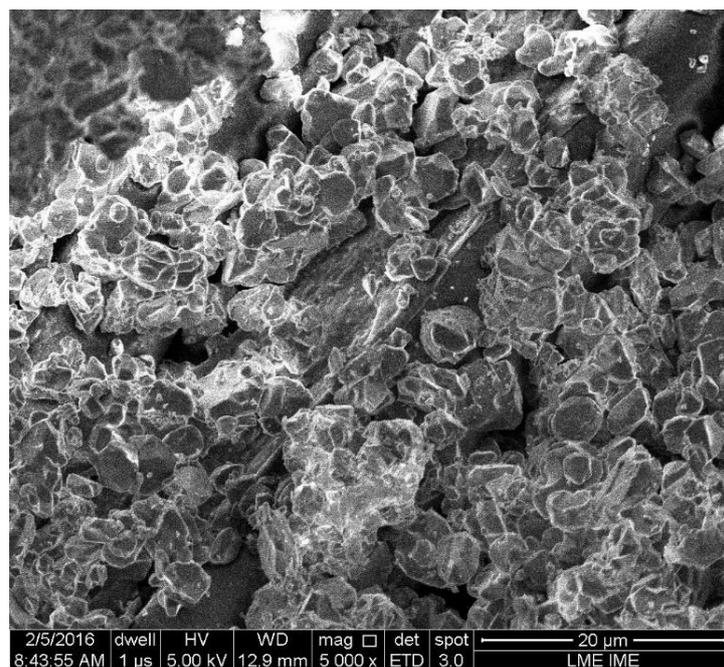


Figura 6. Aspecto geral dos SBMs após o impacto balístico: (a) SBM com cerâmica plana; (b) SBM com cerâmica convexa.

A Fig. 7 mostra o aspecto microscópico da região de impacto. Não há sinais do projétil, e a fratura de muitas fibras de aramida pode ser observada (Fig. 7a). O cerâmico, por sua vez, foi fragmentado em pequenas partículas (Fig. 7b), que se depositaram sobre a superfície das fibras de aramida.



(a)



(b)

Figura 7. Aspecto microscópico da região de impacto: (a) fibras rompidas; (b) fragmentos cerâmicos.

4 SUMÁRIO E CONCLUSÕES

- No presente trabalho, foi investigado o comportamento balístico de blindagens cerâmicas com face de impacto tanto plana quanto convexa.
- A cerâmica convexa mostrou desempenho superior ao da cerâmica plana, ocorrendo queda no trauma em 19%.

- Os mecanismos de fratura da blindagem se mostraram similares, havendo fragmentação do cerâmico e do projétil, bem como deposição dos fragmentos na superfície das fibras de aramida.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem as agências de fomento CAPES, FAPERJ CNPq pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 Akella K, Naik NK. Composite armor – A review. J. Indian Inst. Sci.. 2015; 95(3): 297–312.
- 2 Silva MV, Stainer D, Al-Qureshi HA, Hotza D. Blindagens Cerâmicas para Aplicações Balísticas: Uma Revisão. Cerâmica. 2014; 60: 323-331.
- 3 Mobasser AA, Ansari AR, Zarei HR, Sedighi M, Mobasser F. Optimization of Combined Layers Produced by the Ceramic/Composite and Ceramic/Aluminum Plates. Aust. J. Basic & Appl. Sci. 2013; 7(6): 199-210.
- 4 Grujicic M, Pandurangan B, d'Entremont B. The Role of Adhesive in the Ballistic/Structural Performance of Ceramic/Polymer–Matrix Composite Hybrid Armor. Mater. Design. 2012; 41; 380-393.
- 5 Savio SG, Senthil P, Singh V, Ghosthal P, Madhu V, Gogia AK. An Experimental Study on the Projectile Defeat Mechanism of Hard Steel Projectile against Boron Carbide Tiles. International Journal of Impact Engineering. 2015; 86: 157-166.
- 6 Monteiro SN, Lima Jr. EP, Louro LHL, Silva LC, Drelich JW. Unlocking Function of Aramid Fibers in Multilayered Ballistic Armor. Metall. Mater. Trans. A. 2014; 46a: 37-40.
- 7 Monteiro SN, Louro LHL, Gomes AV, Chagas CFM, Caldeira AB, Lima Jr. EP. How effective is a convex $Al_2O_3-Nb_2O_5$ ceramic armor? Ceram. Int. 2016; 42(6):7844-7847.
- 8 Fawaz Z, Behdinan K, Xu Y. Optimum Design of Two-Component Composite Armour against High-Speed Impact. Compos. Struct. 2006; 73: 253-262.
- 9 Zaera R, Sánchez-Gálvez V. Analytical Modeling of Normal and Oblique Ballistic Impact on Ceramic/Metal Lightweight Armour. Int. J. Impact. Eng. 1998: 133-148.
- 10 Allen WA, Mapes JM, Wilson WG. An Effect Produced by Oblique Impact of a Cylinder on a Thin Target. J. Appl. Phys. 1954; 25: 675-676.
- 11 Hohler V, Weber K, Tham R, James B, Baker A, Pickup I. Comparative Analysis of Oblique Impact on Ceramic Composite Systems. Int. J. Impact. Eng. 2001; 26: 333-344.
- 12 NIJ Standards-0101.06. Ballistic Resistance of Body Armor. U.S. Department of Justice/Office of Justice Programs - National Institute of Justice. 2000.
- 13 ABNT NBR 15000. Blindagens para impactos balísticos - classificação e critérios de avaliação. 2005.
- 14 Monteiro SN, Milanezi TL, Louro LHL, Lima Jr. EP, Braga FO, Gomes AV, Drelich JW, Novel ballistic ramie fabric composite competing with Kevlar™ fabric in multilayered armor. Mater. Design. 2016a; 96: 263-269.