

METODOLOGIA DOE PARA COMPARAÇÃO DE BLINDAGENS COMPÓSITAS COM DIFERENTES ESPESSURAS DE CAMADA*

Fábio de Oliveira Braga¹
Michelle Souza Oliveira²
Sergio Neves Monteiro³
Édio Pereira Lima Jr.⁴

Resumo

A proteção balística para uso pessoal contra projéteis de alta energia, como o 5,56 mm ou o 7,62 mm, exige materiais com diferentes propriedades dispostos em camadas, cada uma cumprindo uma função distinta no comportamento geral da blindagem. Estudos recentes mostram que compósitos reforçados com fibras naturais podem integrar com sucesso estes sistemas, formando as chamadas blindagens compósitas ou blindagens multicamada (SBM). Estes sistemas permitem diminuir o peso das blindagens em relação às placas de único material, permitindo uma maior mobilidade do usuário. Uma característica importante que influencia fortemente no desempenho deste tipo de blindagem é a razão entre as espessuras de camada. A otimização destas espessuras pode ser feita com o auxílio de técnicas de planejamento de experimentos (DOE), aplicadas, por exemplo, aos ensaios balísticos das placas. Deste modo, o objetivo do presente trabalho é desenvolver uma metodologia para otimização das espessuras de um SBM composto de uma cerâmica frontal, uma segunda camada de epóxi reforçado com tecido de curauá (fibra natural de alta resistência), e uma camada posterior de alumínio. A aplicação das técnicas estatísticas permitiu a escolha da configuração ótima dentro do intervalo estudado, promovendo maior absorção de trauma e menor peso.

Palavras-chave: Blindagem multicamada; Compósito; Fibra natural; Ensaio balístico; Planejamento de experimentos.

DOE METHODOLOGY FOR COMPARISON BETWEEN COMPOSITE ARMORS WITH DIFFERENT LAYER'S THICKNESS

Abstract

The ballistic protection for personal use against high energy projectiles, such as the 5.56 or the 7.62 mm, demand materials with several properties, arranged in layers, each one having a distinct function in the global performance of the armor. Recent studies show that natural fiber reinforced composites are able to successfully integrate them, resulting in the systems known as composite armors or multilayered armors (MAS). These systems can decrease the weight of the armor relative to the monolithic plates, allowing a better mobility for the wearer. An important characteristic that strongly influences the performance of this type of armor is the ratio between the thicknesses of the layers. The optimization of these layers can be performed by using design of experiments (DOE) techniques, applied, for example, to the ballistic tests of the armor plates. So, the objective of this work is to develop a methodology for thickness optimization of a MAS with a ceramic front, a second layer of epoxy reinforced with curaua fiber (high strength natural fiber) and an aluminum back layer. The application of statistic techniques allowed choosing optimal configuration within the studied interval, promoting more trauma absorption and less weight.

Keywords: Multilayered armor; Composite armor; Composite; Natural fiber; Ballistic test, Design of experiments.

- ¹ *Engenheiro Metalurgista, D.Sc., Coordenador, Pós-graduação em Engenharia de Soldagem e Engenharia de Inspeção de Equipamentos e Materiais, Faculdade SENAI Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. fabio_obraga@yahoo.com.br.*
- ² *Engenheira Civil, Mestranda em Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ³ *Engenheiro Metalurgista, Ph.D., Docente, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ⁴ *Engenheiro Mecânico, D.Sc., Docente, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Com o contínuo avanço na tecnologia de armas e munições, maiores se tornam os desafios na área de blindagens balísticas. Para proteção contra armas leves, fibras sintéticas como a aramida e o polietileno de ultra-alto peso molecular são os mais utilizados. Por outro lado, contra projéteis de alta energia, com velocidades superiores a 800 m/s, é necessária a utilização de materiais de alta dureza, como as cerâmicas, que possibilitam a fratura da ponta do projétil e a redistribuição da energia de impacto [1-3].

Por sua natureza frágil, as cerâmicas necessitam de camadas de apoio, que absorvam seus fragmentos e o restante da energia de impacto. Para esta função, laminados de tecidos sintéticos, compósitos e metais dúcteis podem ser utilizados, sendo o conjunto denominado sistema de blindagem multicamada (SBM). Estes sistemas permitem diminuir o peso das blindagens em relação às placas de único material, permitindo uma maior mobilidade do usuário [4-6].

Recentemente, compósitos reforçados com fibras naturais têm sido testados com sucesso para as camadas de apoio, juntamente com uma camada de liga alumínio, formando um apoio leve, eficiente e de baixo custo [7-11]. Entre as principais fibras naturais, se destaca a fibra de curauá, produzida a partir das folhas da bromeliácea amazônica *Ananas Erectifolius*. Estas fibras possuem alta resistência e rigidez, e possibilitam um excelente reforço em compósitos [12-13].

Nos SBMs, em geral, a relação de espessuras das camadas é de grande importância, pois cada material tem sua função específica, e influencia de forma distinta o comportamento geral da blindagem. Uma característica importante que influencia fortemente no desempenho deste tipo de blindagem é a razão entre as espessuras de camada. A otimização destas espessuras pode ser feita com o auxílio de técnicas de planejamento de experimentos (DOE), aplicadas, por exemplo, aos ensaios balísticos das placas [14-16].

Portanto, o objetivo do presente trabalho é desenvolver uma metodologia para otimização das espessuras de um SBM composto de uma cerâmica frontal, uma segunda camada de epóxi reforçado com tecido de curauá (fibra natural de alta resistência), e uma camada posterior de alumínio.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O SBM do presente 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 epoxídico reforçado com 30% de tecido de curauá (Figura 1), e uma camada posterior de liga de Alumínio 5052 H34, conforme esquema apresentado na Figura 2. A fabricação da camada frontal e intermediária está detalhada em [13].

Cada camada foi produzida (no caso da cerâmica e do compósito) ou fornecida (no caso do alumínio) em três diferentes espessuras, como mostra a Tabela 1. É importante observar que a espessura da camada influencia o seu peso, ou densidade superficial (D_{sup}), termo mais comum em placas de blindagem. A Tabela 1 mostra as espessuras das camadas em três níveis, -1, 0 e +1, que representam, respectivamente, os níveis mínimo, médio e máximo, além de suas D_{sup} .

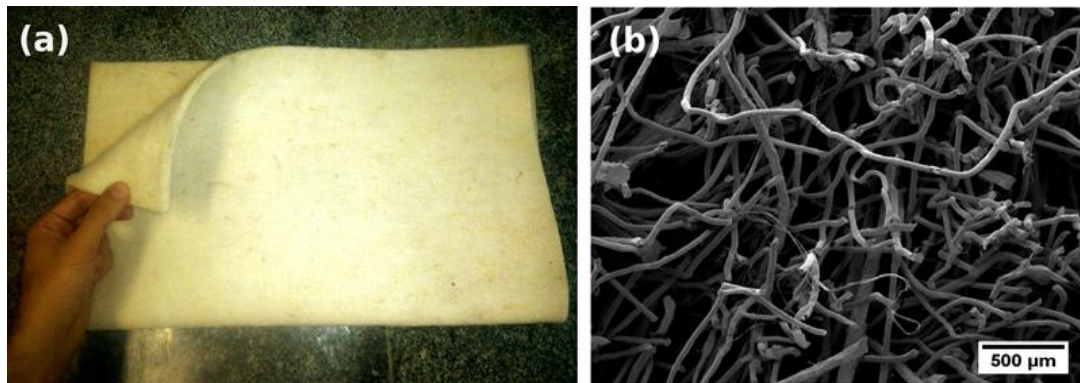


Figura 1. Tecido de curauá utilizado como reforço nos compósitos da camada intermediária da blindagem: (a) aspecto geral; (b) aspecto microscópico.

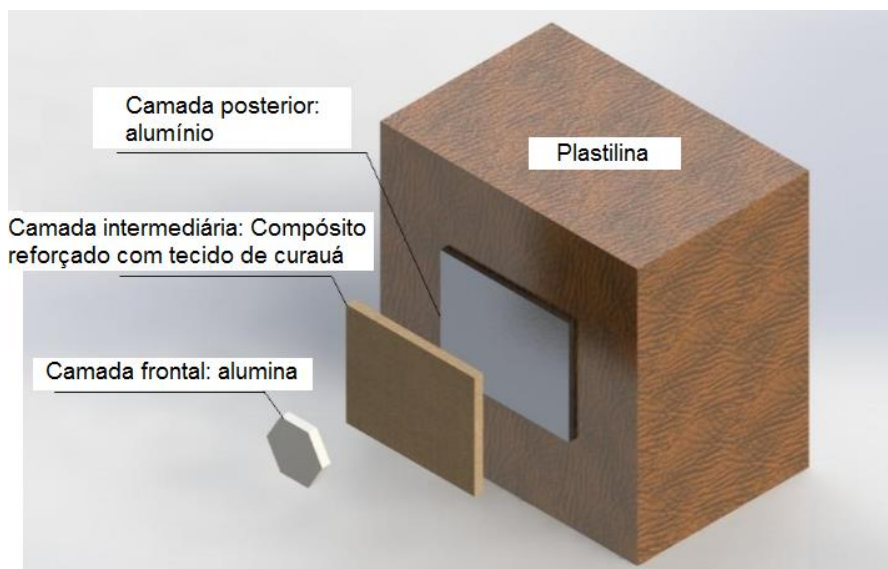


Figura 2. Composição do SBM do presente trabalho, como preparação para o ensaio balístico (em frente a um bloco de plastilina).

Tabela 1. Espessuras (t) de cada camadas e suas densidades superficiais (D_{sup}).

C_i	Camada					
	Cerâmica		Compósito reforçado com tecido de curauá		Alumínio	
	t_1 (mm)	D_{sup} (kg/m ²)	t_2 (mm)	D_{sup} (kg/m ²)	t_3 (mm)	D_{sup} (kg/m ²)
-1	8,5	30,01	6,5	6,96	3,0	7,98
0	10,5	37,07	11,5	12,31	5,0	13,30
+1	12,5	44,13	16,5	17,65	7,0	18,62

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 2a) modelo B290, da marca High Pressure Instrumentation, localizado a 15 m do alvo (blindagem) (Figura 2b), conforme previsto na norma NIJ-0101.06 [17]. O disparo foi realizado na horizontal ($\theta=0^\circ$). A blindagem foi posicionada em frente a um bloco de plastilina (Figura 2b), 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 [17].

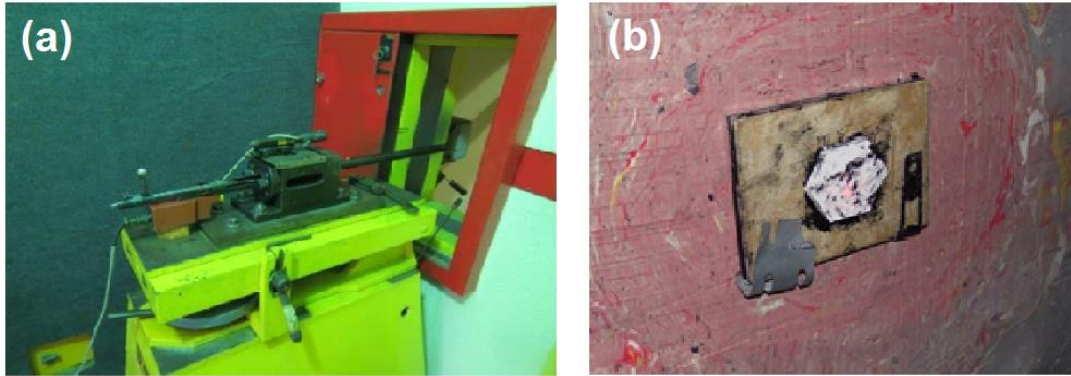


Figura 2. Ensaio balístico: (a) provete com mira a laser; (b) SBM posicionado em bloco de plastilina a 15 m do provete.

Para verificar a influência da espessura de cada camada no trauma, os corpos-de-prova foram produzidos seguindo uma matriz experimental de Box-Behnken (3 fatores e 3 níveis) [16]. O espaço experimental desta condição pode ser visto na Figura 3. No presente trabalho, os três fatores são as três camadas, 1 é a cerâmica, 2 o compósito e 3 o alumínio, e os níveis são as três diferentes espessuras de cada camada, como mostrado na Tabela 1. Dentro do modelo, para aumentar a significância estatística, cada ponto fatorial foi ensaiado em duplicata, bem como os pontos centrais, que de 3 (como prevê o modelo) passaram a ser 6. A vantagem deste método é a possibilidade de se medir a interação entre as variáveis e a eliminação de pontos críticos de difícil medição, que seriam os vértices do cubo da Figura 3.

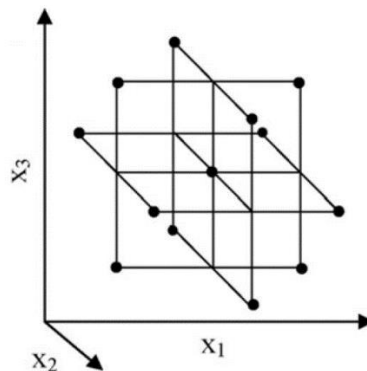


Figura 3. Espaço experimental de Box-Behnken, com três fatores (x_1 , x_2 e x_3) e três níveis.

Para aplicação do método, é necessária a codificação das variáveis em com a Equação 1:

$$c_i = \frac{t_i - t_m}{\delta} \quad (1)$$

Onde: c_i = variável codificada, podendo assumir os valores -1, 0 e +1 (como obtido Tabela 1); t_i = espessura de camada do fator i ($i=1$ para a cerâmica; $i=2$ para o compósito e $i=3$ para o alumínio); t_m = média das espessuras da camada; $\delta = |t_i - t_m|$.

Por conveniência, a representação de um SBM foi realizada por um conjunto de três índices, cada um representando um c_i para a camada. Por exemplo, o SBM 101 é aquele com $c_1 = +1$ (cerâmica de 12,5 mm), $c_2 = 0$ (compósito de 11,5 mm) e $c_3 = +1$ (alumínio de 7 mm). Além disso, o índice -1 foi substituído por $\bar{1}$, como em $\bar{1}0\bar{1}$.

Após isto, uma regressão múltipla foi realizada, a fim de se ajustar um polinômio de segundo grau aos dados experimentais, como o da Equação 2:

$$\text{Trauma} (c_1, c_2, c_3) = a + b_1c_1 + b_2c_2 + b_3c_3 + b_4c_1c_2 + b_5c_1c_3 + b_6c_2c_3 + b_7c_1^2 + b_8c_2^2 + b_9c_3^2 \quad (2)$$

Ao final, foi desenvolvido um índice de desempenho para comparar as diferentes placas balísticas de diferentes densidades superficiais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 mostra o resultado dos ensaios balísticos nos SBMs. Observa-se que alguns foram perfurados pelo projétil 7,62 mm, além de resultarem em um Trauma maior que os 44 mm permitidos.

Tabela 2. Espessuras (t) de cada camadas e suas densidades superficiais (D_{sup}).

Corpos-de-prova Segundo a matriz de Box-Behnken			Resultados			
c_1	c_2	c_3	D_{sup} (kg/m ²)	Trauma (mm)		Perfuração?
-1	-1	0	50.5	37	37	Sim
1	-1	0	64.6	20	14	Não
-1	1	0	61.2	29	21	Não
1	1	0	75.3	21	16	Não
-1	0	-1	50.4	53	42	Sim
1	0	-1	64.5	22	22	Não
-1	0	1	61.2	20	25	Não
1	0	1	75.3	9	21	Não
0	-1	-1	52.1	51	57	Sim
0	1	-1	62.8	24	35	Não
0	-1	1	62.9	17	25	Não
0	1	1	73.6	14	26	Não
0	0	0	62.9	28	28	Não
0	0	0	62.9	27	22	Não
0	0	0	62.9	20	19	Não

Com base na Tabela 2 foi feita a regressão múltipla (Equação 2) aplicada aos dados experimentais, como mostra a Equação 3.

$$\text{Trauma} (c_1, c_2, c_3) = (24,21 \pm 1,41) + (-7,53 \pm 1,32) c_1 + (-4,55 \pm 1,32) c_2 + (-9,31 \pm 1,32) c_3 + (3,48 \pm 1,87) c_1c_2 + (4,29 \pm 1,87) c_1c_3 + (5,85 \pm 1,87) c_2c_3 + (4,64 \pm 1,93) c_3^2 \quad (3)$$

A Equação 3 pode ser melhor visualizada pela Figura 4, que são as superfícies de resposta do Trauma em função de duas das camadas, com uma delas fixa. Optou-se por fixar a camada de alumínio em cada uma das imagens (Figura 4a, 4b e 4c).

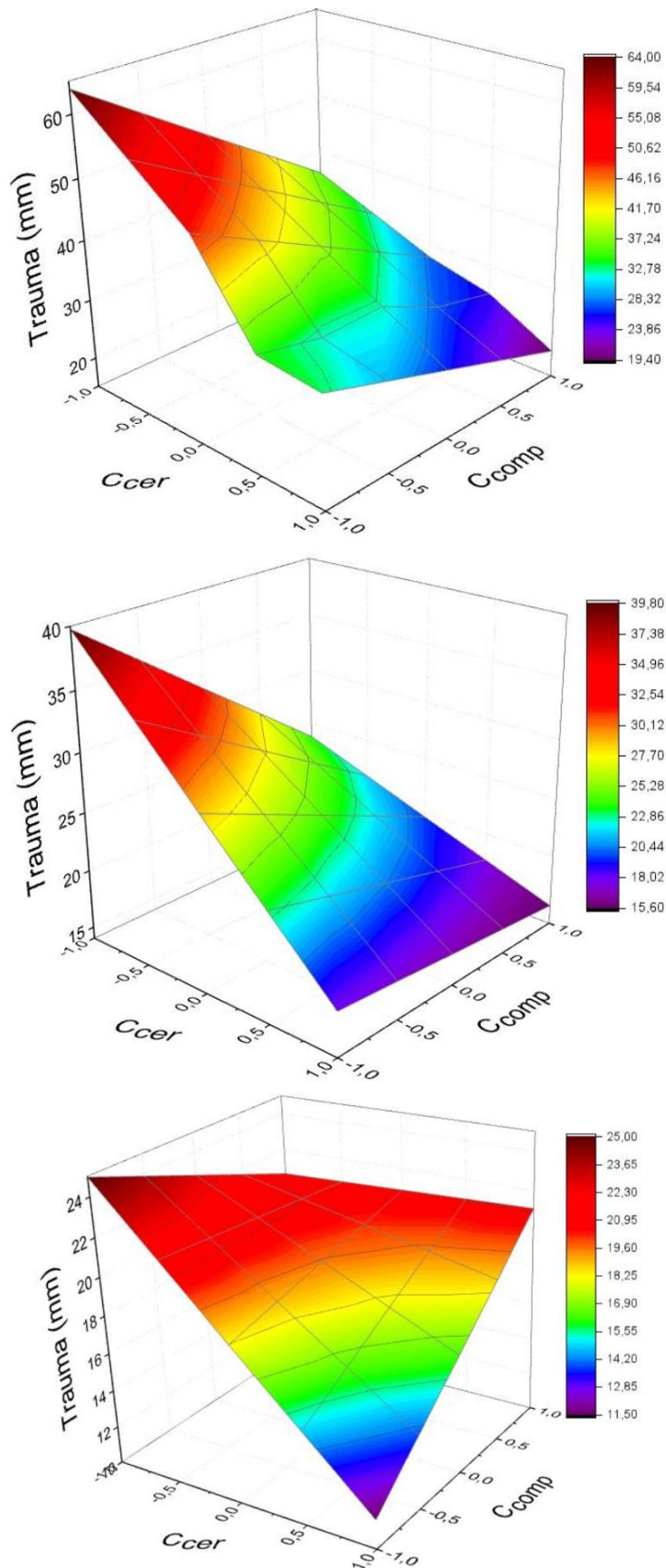


Figura 4. Respostas de trauma em função das espessuras codificadas C1 e C2, com espessura real do alumínio fixada em (a) 3 mm ($c_3 = -1$); (b) 5 mm ($c_3 = 0$); (c) 7 mm ($c_3 = 1$).

Pela avaliação da Equação 3 e Figura 4, observa-se que o coeficiente da regressão associado à camada cerâmica ($\beta_1 = -7,53 \pm 1,32$) é numericamente menor que o associado ao alumínio ($\beta_3 = -9,31 \pm 1,32$). A influência da espessura do compósito também foi significativa no Trauma ($\beta_2 = -4,55 \pm 1,32$). O fato de β_3 ser maior que β_1 indica a maior importância da deformação plástica do material metálico da terceira camada na absorção do trauma do que a fratura da cerâmica, além de o alumínio provocar um efeito de segunda ordem ($\beta_9=4,64$), ou seja, este possui uma grande influência na absorção do trauma. Interações entre as camadas foram identificadas, como evidenciado pelos coeficientes β_4 , β_5 , β_6 e β_9 . Tais interações podem ser atribuídas à propagação das ondas de choque através das camadas. Estas ondas sofrem múltiplas reflexões nas interfaces, e a magnitude das ondas refletidas e transmitidas depende da diferença de impedância das diferentes camadas do SBM [18].

Apesar do menor coeficiente β_1 , já foi mostrado em trabalhos anteriores a relevância da cerâmica na fragmentação do projétil, bem como sua importância no comportamento geral da blindagem [13]. Pode ser verificado que alguns corpos-de-prova com cerâmica no nível -1 tiveram fragmentação parcial do projétil ou perfuração do compósito e/ou alumínio, como pode ser visto na Figura 5. Isto pode indicar a aproximação do limite de diminuição de espessura da cerâmica, ou seja, é provável que a espessura da cerâmica não possa ser diminuída abaixo de 8,5 mm, pois neste caso haverá alto risco de perfuração devido à insuficiente fragmentação do projétil.

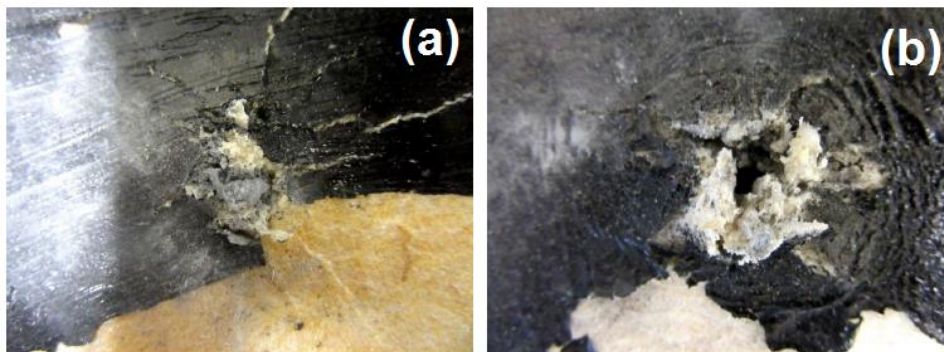


Figura 5. Detalhe do verso do compósito nas placa (a) $\bar{I}10$ e (b) $\bar{I}0\bar{I}$, que possuem a cerâmica no nível mínimo (-1). Observa-se fragmentação apenas parcial do projétil.

Para comparação entre os SBMs, foi desenvolvido um índice de desempenho que leva em consideração o Trauma na Equação 3 e Tabela 2 e a densidade superficial (D_{sup}) da Tabela 2. Ele foi denominado neste trabalho como índice Trauma-Peso (ITP), e é calculado pela Equação 4.

$$ITP = \left(\frac{44 \text{ mm}}{\text{Trauma}} \right) \left(\frac{100}{D_{sup}} \right) \quad (3)$$

Neste caso, quanto maior o valor do ITP, em princípio, melhor o desempenho da blindagem em absorção de energia do projétil por unidade de massa e área. A Tabela 3 mostra este índice calculado para cada configuração.

Tabela 3. Índices calculados para comparação entre os SBMs.

Configuração	Trauma (mm)	D_{sup} (kg/m ²)	ITP (mm/kg/m ²)
1̄1̄0	40	50,5	2,2
1̄1̄0	18	64,6	3,8
1̄1̄0	24	61,2	3,0
110	16	75,3	3,7
1̄0̄1̄	50	50,4	1,7
10̄1̄	26	64,5	2,6
1̄01	23	61,2	3,2
101	16	75,3	3,6
0̄1̄1̄	49	52,1	1,7
01̄1̄	28	62,8	2,5
0̄11	18	62,9	3,8
011	21	73,6	2,9
000	24	62,9	2,9

Pela análise da Tabela 3, observa-se que os maiores ITP foram calculados para as configurações 0̄1̄1̄ (ITP = 3,8), 1̄1̄0 (ITP = 3,8), 110 (ITP = 3,7) e 101 (ITP = 3,6). Observa-se a vantagem dos SBMs com camada de alumínio no nível +1, possuindo 3 dos 4 maiores ITP. De fato, a mesma análise estatística anterior (regressão múltipla) aplicada ao índice ITP como variável de saída, indica uma influência predominante da camada de alumínio, como mostra Equação 4.

$$ITP = (2,89 \pm 0,13) + (0,45 \pm 0,08)c_1 + (0,60 \pm 0,08)c_3 - (0,23 \pm 0,2)c_2c_3 - (0,29 \pm 0,12)c_3^2 \quad (4)$$

Um breve exame da Equação 4 permite concluir que os valores máximos de ITP ocorrem para os valores mínimos de espessura do compósito (c_2), devido à interação com a camada de alumínio (c_3). Por este motivo, c_2 foi fixado em -1, e foi construída a superfície de respostas da Figura 6.

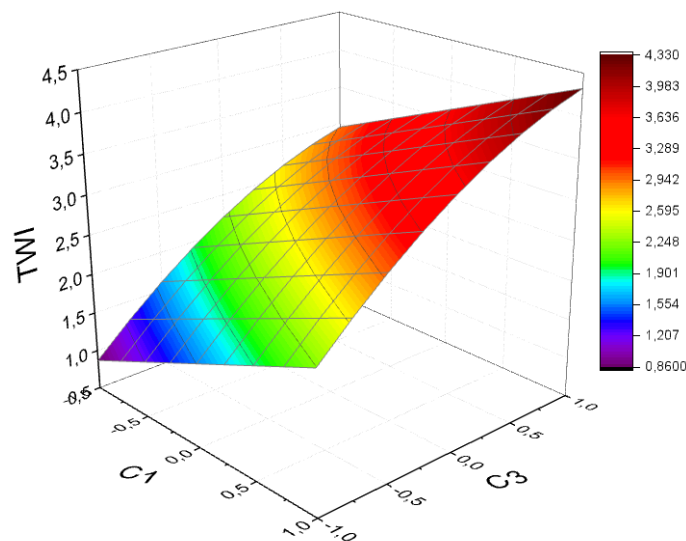


Figura 6. Resposta do ITP em função das espessuras codificadas C_1 (cerâmico) e C_3 (alumínio), com espessura real do compósito fixada em 6,5 mm ($C_2 = -1$).

Pela análise da Figura 6, observa-se que o ponto de máximo do modelo ocorre para $c_1 = +1$, $c_2 = -1$ e $c_3 = +1$, chegando ao valor de ITP de 4,3. Este resultado pode ser comparado com os valores da Tabela 3, e observa-se que as configurações experimentais de maior ITP, 011 (ITP = 3,8) e 110 (ITP = 3,8), são bem próximas ao otimizado (ponto de máximo da Figura 6).

3 SUMÁRIO E CONCLUSÕES

No presente trabalho, foram estudadas diversas configurações de espessuras de um sistema de blindagem multicamada (SBM) utilizado para proteção balística contra projéteis 7.62 mm. Este SBM possui camada frontal cerâmica ($Al_2O_3-4\%Nb_2O_5$), uma segunda camada de epóxi reforçado com tecido de curauá, e uma camada posterior de alumínio 5052 H34. As seguintes conclusões foram obtidas:

- Com o auxílio do delineamento experimental de Box-Behnken e da Metodologia de Superfície de Resposta, foi possível quantificar a influência das espessuras de camada no comportamento geral da blindagem multicamada estudada. A maior influência provém do alumínio, seguido da cerâmica e do compósito.
- Foi identificada e quantificada a interação entre as camadas, que é relativa à interação das ondas de choque nas interfaces entre materiais. Esta relação foi significativa em todas as interfaces.
- Foi desenvolvido um índice de desempenho, denominado Índice Trauma-Peso (ITP), para comparação entre os sistemas de blindagem testados. O ITP se mostrou adequado do ponto de vista da segurança, apresentando um baixo valor quando o trauma se aproxima e ultrapassa os 44 mm estabelecidos pela NIJ-0101.06 (2008).
- As configurações de maior ITP testadas experimentalmente neste trabalho foram a 011 e 110 (ITP = 3,8). Por meio da regressão múltipla aplicada ao ITP foi possível verificar a condição otimizada dentro do intervalo testado, que é a configuração 111 (ITP = 4,3).

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 Akella K, Naik N. Composite Armor – A Review. Journal of the Indian Institute of Science. 2015;95(3):297-312.
- 2 Yadav S, Ravichandran G. Penetration Resistance of Laminated Ceramic/Polymer Structures. International Journal of Impact Engineering. 2003;28:557–574.
- 3 Silva MV, Stainer D, Al-Qureshi HÁ, Hotza D. Blindagens Cerâmicas para Aplicações Balísticas: Uma Revisão. Cerâmica. 2014.60:323-331.
- 4 Medvedovski E. Adv. Appl. Lightweight Ceramic Composite Armour System. Ceram. 2006;105(5):241-245.
- 5 Medvedovski E. Ballistic Performance of Armour Ceramics: Influence of Design and Structure. Part 1. Ceram. Int. 2010;36:2103-2115.
- 6 Salamé JM, Quefelec B. Ceramic-faced molded armor. In Bhatnagar A, editor. Lightweight ballistic composites. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006. p. 398-415.

- 7 Monteiro SN, Lima Jr. EP, Louro LHL, Silva LC, Drelich JW. Unlocking Function of Aramid Fibers in Multilayered Ballistic Armor. Metallurgical and Materials Transactions A. 2014;46A:37-40.
- 8 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 2016. 96:263-269.
- 9 Monteiro SN, Candido VS, Braga FO, Bolzan LT, Weber RP, Drelich JW. Sugarcane Bagasse Waste in Composites for Multilayered Armor. Eur. Polym. J. 2016. 78:173-185.
- 10 Braga FO, Bolzan LT, Ramos FJHTV, Monteiro SN, Lima Jr. EP, Silva LC. Ballistic Efficiency of Multilayered Armor Systems with Sisal Fiber Polyester Composites. Materials Research. 2017; 20(2):767-774.
- 11 Monteiro SN, Assis FS, Ferreira CL, Simonassi NT, Weber RP, Oliveira MS, Colorado HA, Pereira AC. Figue Fabric: A Promising Reinforcement for Polymer Composites. Polymers. 2018. 10(246):1-10.
- 12 Monteiro SN, Braga FO, Lima EP, Louro LHL, Drelich JW. Promising Curaua Fiber Reinforced Polyester Composite for High Impact Ballistic Multilayered Armor Polym. Eng. Sci. 2017. 57(9):947-954.
- 13 Braga FO, Bolzan LT, Luz FS, Lopes PHLM, Lima Jr. EP, Monteiro SN. High energy ballistic and fracture comparison between multilayered armor systems using non-woven curaua fabric composites and aramid laminates J. Mater. Res. Technolol. 2017. 57(9):417-422.
- 14 Rodrigues MI, lemma AF. Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos. 3ª ed. Campinas: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor. 2014.
- 15 Akubue PC, Igbokwe PK, Nwabanne JT. Production of Kenaf Fibre Reinforced Polyethylene Composite for Ballistic Protection. International Journal of Scientific & Engineering Research. 2015;6(8):1-7.
- 16 Box GEP, Behnken DW. Technometrics 1960. 2(4):455-475.
- 17 NIJ Standards 0101.06. Ballistic Resistance of Body Armor. Washington: National Institute of Justice (NIJ). 2008.
- 18 Meyers MA. Dynamic Behavior of Materials. New York: John Wiley & Sons. 1994.