

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMA DE BLINDAGEM MULTICAMADAS USANDO TÉCNICAS ESTATÍSTICAS DE BOX-BEHNKEN DESIGN E ANÁLISE DE REGRESSÃO MÚLTIPLA*

*Fabio Da Costa Garcia Filho¹
Michelle Souza Oliveira²
Luana Cristyne Da Cruz Demosthenes³
Édio Pereira Lima Jr⁴
Fábio Oliveira Braga⁵
Fernanda Santos da Luz⁶
Sergio Neves Monteiro⁷*

Resumo

Investigações recentes em sistemas de blindagem de multicamadas (SBMs) usando compósitos de fibras naturais e tecidos, como segunda camada, mostraram resultados promissores. No presente trabalho, um SBM composto de cerâmica de alumina como primeira camada, compósito reforçado com tecido de curauá como segunda camada e liga de alumínio como terceira camada foi estudado. O objetivo foi investigar a influência da espessura / densidade de camadas no comportamento geral da blindagem e propor uma configuração de espessura otimizada para as camadas. A fibra de curauá é uma das fibras lignocelulósicas naturais (FNLs) mais resistentes e sua manta tem potencial para aplicações de engenharia. O Box-Behnken Design (BBD) e a Análise de Regressão Múltipla (MRA) foram aplicados para estudar as propriedades do SBM e para melhorar o desempenho da blindagem, reduzindo sua espessura total / densidade superficial. Testes balísticos foram realizados e os resultados de profundidade de indentação foram utilizados como medida da eficiência do SBM. O BBD-MRA foi eventualmente comparado a um ajuste linear simples (SLA) aplicado ao SBM e a um laminado de aramida previamente estudado. A otimização do SBM referente ao BBD-MRA mostrou uma redução de 56% na espessura da blindagem em comparação com a aramida e uma redução de 8,8% em comparação com a otimização do SLA.

Palavras-chave: Sistema de Blindagem multicamadas; Compósitos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas; Box-Behnken Design.

OPTIMIZATION OF MULTILAYERED ARMOR SYSTEM USING BOX-BEHNKEN DESIGN AND MULTIPLE REGRESSION ANALYSIS STATISTICAL TECHNIQUES

Abstract

Recent investigations in multilayered armor systems (MAS) using natural fiber composites and fabrics, as a second layer, have shown promising results. In the present work, a SBM composed of alumina ceramic as first layer, composite reinforced with curauá woven fabric as second layer and aluminum alloy as third layer was studied. The objective was to investigate the influence of layer thickness / density on the overall shielding behavior and to propose an optimized thickness configuration for the layers. Curauá fiber is one of the most resistant natural lignocellulosic fibers (NLFs) and its fabric woven has potential for engineering applications. Box-Behnken Design (BBD) and Multiple Regression Analysis (MRA) were applied to study the properties of the SBM and to improve shielding performance, reducing its overall thickness / area density. Ballistic tests were performed and the indentation depth results were used as a measure of the SBM efficiency. The BBD-MRA was eventually compared to a simple linear adjustment

(SLA) applied to the SBM and to a previously studied aramid laminate. The optimization of SBM for BBD-MRA showed a 56% reduction in shield thickness compared to aramid and a reduction of 8.8% compared to SLA optimization.

Keywords: Multilayered Armor System; Composites reinforced with natural lignocellulosic fibers; Box-Behnken Design.

- ¹ *Engenheiro de Materiais, Mestrando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ² *Engenheira Civil, Mestrando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ³ *Engenheira Civil, Mestrando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ⁴ *Engenheiro Mecânico, D.Sc em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ⁵ *Engenheiro Metalúrgico, D.Sc em Ciência dos Materiais, SENAI, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ⁶ *Engenheira de Materiais, D.Sc em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ⁷ *Engenheiro Metalúrgico, Ph.D em Materials Science and Engineering, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O aumento dos conflitos armados em diversos locais no mundo [1] exige novas pesquisas no campo da defesa balística pessoal. Esses conflitos, embora indesejáveis, são motivo de preocupação para militares, policiais e cidadãos de nações democráticas.

Um tipo de armamento amplamente difundido é o rifle de calibre 7,62 mm. Sua munição pode atingir velocidades acima de 850 m/s, o que resulta em uma energia de impacto acima de 3,5 kJ. A ponta afiada do projétil concentra as cargas em uma área muito pequena e pode causar sérios danos [2-3].

Uma estratégia comum para derrotar os projéteis de 7,62 mm é usar materiais de alta resistência e alta dureza, como cerâmicas avançadas, como face frontal em blindagens balísticas. O objetivo é erodir e deformar a ponta afiada, absorvendo e redistribuindo a energia de impacto [3-6].

No entanto, cerâmicas são de natureza frágil e precisam de materiais de apoio para parar o estilhaço após o impacto. Tradicionalmente, tecidos de fibra sintética de alto desempenho, como aramida, compósitos reforçados com fibras ou metais dúcteis, como o alumínio, têm sido usados para essa aplicação [7-9]. Mais recentemente, compósitos reforçados com fibras naturais foram investigados [10-11]. Esses compósitos revelaram bom desempenho balístico, apresentando vantagens econômicas e ambientais [12]. O conjunto de materiais cerâmicos com os supracitados materiais de suporte são chamados de sistemas de blindagem multicamadas (SBMs) [10-11].

Entre as fibras lignocelulósicas naturais (FNLs), destaca-se a fibra de curauá (*Ananas Erectifolius*) por conta das suas incríveis propriedades mecânicas. Propriedades mecânicas [13-14] e balísticas [15-18] de compósitos reforçados com fibra de curauá têm sido amplamente investigadas. Monteiro et al. [19] revisaram as propriedades de vários FNLs, incluindo o curauá. Eles mostraram valores de Módulo de Young e razão resistência/peso de até 80 GPa e 2193 MPa.cm³/g, respectivamente. Estes são da mesma ordem de grandeza que as fibras de vidro e aramida.

Braga et al. [18] conduziram um estudo preliminar sobre as propriedades balísticas e de fratura de um SBMs composto de cerâmica de alumina como camada frontal, compósito reforçado com manta de curauá como segunda camada e liga de alumínio 5052 H34 como terceira camada. Eles descobriram que este SBMs fornece uma absorção satisfatória do trauma, de acordo com a metodologia NIJ-0101.06 [20], e também observaram os mesmos mecanismos de fratura que um tecido Kevlar® quando empregado em um SBMs com configuração similar. Nesse estudo anterior [18], os autores não quantificaram a contribuição de cada camada para a absorção do trauma MAS, nem encontraram configuração com espessura otimizada. Portanto, o objetivo do presente trabalho é aplicar ferramentas estatísticas para quantificar a influência da espessura da camada no desempenho geral de um SBM com compósito poliméricos reforçado com manta de curauá, e também propor uma configuração de espessura otimizada para suas camadas. Ferramentas estatísticas como o Box-Behnken Design (BBD) [21-22] e a Análise de regressão múltipla (MRA) [23] foram utilizadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O SBMs investigado no presente trabalho é composto por uma camada frontal de cerâmica seguido de um compósito de matriz epóxi reforçado com 30 vol.% de manta de curauá e uma camada posterior de liga de alumínio 5052 H34 (AA).

A cerâmica utilizada foi a alumina (Al_2O_3) dopada com 4% em peso de nióbia (Nb_2O_5). O pó de alumina foi fornecido pela empresa Treibacher Schleifmittel e o da niobia pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM). O pó foi moído, peneirado, prensado a 30 MPa de pressão e sinterizado a 1400°C por 3 h. As chapas de liga de alumínio 5052 H34 foram fornecidas pela empresa Metalak Metais.

A manta de curauá foi fornecida pela empresa Pematec Triangel. A densidade superficial foi medida como 0,830 kg/m². Fig. 1a mostra o aspecto geral da manta, enquanto a Fig. 1b, o aspecto microscópico. Como pode ser visto na Fig. 1b, as fibras são orientadas aleatoriamente.

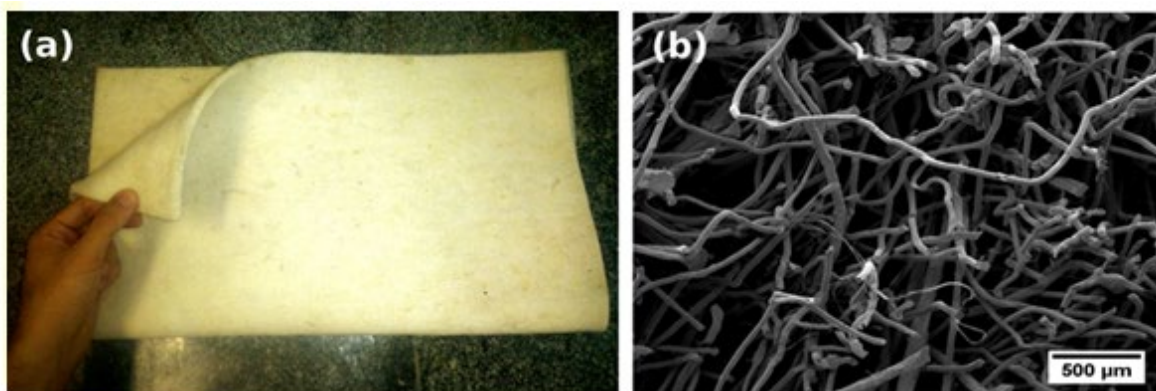


Figura 1 - Manta de Curauá: (a) aspecto geral; (b) aspecto microscópico.

O processo de fabricação do compósito consistiu em empilhar as camadas de manta em um molde de aço, intercalando uma mistura de epóxi-endurecedor fluido, mantendo o conjunto sob pressão compressiva de 5 MPa por 24 h. Foi utilizado o éter diglicidílico da resina epóxi bisfenol-A (DGEBA) e o endurecedor foi o trietileno-tetramina (TETA, 13 phr), ambos produzidos pela Dow Chemical e adquiridos da empresa brasileira Resinpoxy.

Testes balísticos foram realizados seguindo a metodologia especificada pela norma internacional NIJ-0101.06 [20]. Neste método, o SBM é posicionado em frente a um bloco de plastilina do tipo Roma (Fig. 2a), a 15 metros de distância do dispositivo de tiro. O impacto balístico causa uma impressão neste bloco de plastilina, atrás da blindagem, que é conhecida como “trauma”. De acordo com o NIJ 0101.06 [20], a blindagem é considerada eficiente se o trauma for menor que 44 mm. No presente trabalho, o trauma foi tomado como a medida da eficiência do SBMs. O projétil utilizado foi OTAN de 7,62 x 51 mm (9,7 g), munição comercial. O trauma foi medido por um sensor laser especial com precisão de 0,005 mm (fig. 2b).

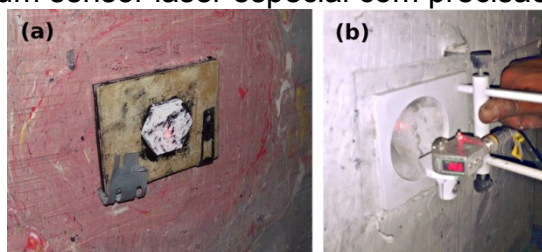


Figura 2 - Teste balístico: (a) SBM montado em frente ao bloco de plastilina; (b) medida do trauma usando um sensor laser.

Para avaliar a influência da espessura de cada camada no trauma, os testes balísticos foram realizados seguindo uma matriz BBD de 3 fatores / 3 níveis [21-22]. Dentro do BBD, para melhorar a significância estatística, os pontos fatoriais foram testados em duplicatas, enquanto o ponto central (000) foi testado seis vezes. A resposta foi então analisada usando o MRA. Para aplicar o BBD, é necessário codificar as variáveis usando a seguinte equação:

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

onde: t_i é a espessura da camada do fator i ($i = 1$ para a cerâmica; $i = 2$ para o compósito e $i = 3$ para o alumínio); c_i é o valor do fator codificado assumido por t_i ; t_m é o valor médio da espessura t e δ é o intervalo $|t_i - t_m|$.

Os materiais foram produzidos (no caso da cerâmica e do compósito) ou adquiridos (no caso do alumínio) em 3 espessuras diferentes (os níveis i da Eq. 1). Os níveis de espessura na BBD são mostrados na Tabela 1. Além disso, as densidades superficial (D_{sup}) das camadas foram calculadas pela Eq. 2, e são mostrados na Tabela 1.

$$D_{sup} = \rho_v t, \quad (2)$$

onde: ρ_v é a densidade aparente da camada; t é a espessura do material.

Tabela 1 - Espessura das camadas e densidades superficiais calculadas.

c_i	Informações da camada					
	Cerâmica		Compósito		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

Por conveniência, as configurações do SBMS foram representadas por um conjunto de três fatores codificados, como 101 e 110. O número -1 foi representado por $\bar{1}$, como $0\bar{1}\bar{1}$ e $\bar{1}0\bar{1}$.

A MRA consiste em encontrar a equação polinomial que melhor descreve o fenômeno estudado. Neste trabalho, uma equação de segunda ordem foi considerada. O modelo ajustado com as variáveis codificadas é mostrado na Eq. 3

$$Trauma(c_1, c_2, c_3) = a + b_1c_1 + b_2c_2 + b_3c_3 + b_4c_1c_2 + b_5c_1c_3 + b_6c_2c_3 + b_7c_1^2 + b_8c_2^2 + b_9c_3^2, \quad (3)$$

onde: c_i é o valor do fator codificado assumido por t_i ; a é o coeficiente linear da regressão e b_i são os coeficientes angulares da regressão. O modelo com as variáveis originais t_i é mostrado a seguir (Eq. 4).

$$Trauma(t_1, t_2, t_3) = \alpha t_1 + \beta_1 t_2 + \beta_2 t_2^2 + \beta_3 t_3 + \beta_4 t_1 t_2 + \beta_5 t_1 t_3 + \beta_6 t_2 t_3 + \beta_7 t_1^2 + \beta_8 t_2^2 + \beta_9 t_3^2, \quad (4)$$

onde: t_i é a espessura da camada do fator i ; α é o coeficiente linear da regressão e β_i são os coeficientes angulares da regressão.

A configuração de espessura usada nos trabalhos anteriores [10-11,15,18] foi a 000, com aproximadamente 10 mm de espessura de cerâmica, 10 mm de compósito e 5 mm de alumínio. Um pequeno ajuste nos valores de espessura foi

realizado para adequar os valores reais encontrados na prática, como visto na Tabela 1.

Como comparação com o modelo BBD / MRA, um ajuste linear simples (SLA) foi aplicado à configuração 000. Isso foi feito para estimar a espessura total necessária para reduzir o trauma aos 44 mm especificados pela norma internacional NIJ [18]. Para isso, foram testados vários corpos de prova com a mesma razão de espessura do 000, e foi realizada uma interpolação linear. Eventualmente, a otimização do BBD-MRA foi comparada ao SLA, para verificar qual técnica fornece o melhor resultado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Testes balísticos

A Tabela 2 mostra os valores de trauma obtidos após os testes balísticos para diferentes SBM. Os valores de D_{sup} também estão apresentados. Em todos os testes, a camada cerâmica foi totalmente fragmentada, e uma deformação por trás da blindagem pôde ser observada. Uma amostra típica testada está ilustrada na Fig. 3. A segunda camada composta foi capaz de bloquear os fragmentos cerâmicos mantendo sua integridade após o impacto. Isso é considerado um requisito para aplicação deste material em sistemas balísticos, especialmente quando consideramos a possibilidade de múltiplos disparos.

Tabela 2 - Valores de trauma obtidos nos testes balísticos para os diferentes amostras

BBD amostras			Resultados		
c ₁	c ₂	c ₃	D_{sup} (kg/m ²)	Trauma (mm)	
-1	-1	0	50.5	37	37
1	-1	0	64.6	20	14
-1	1	0	61.2	29	21
1	1	0	75.3	21	16
-1	0	-1	50.4	53	42
1	0	-1	64.5	22	22
-1	0	1	61.2	20	25
1	0	1	75.3	9	21
0	-1	-1	52.1	51	57
0	1	-1	62.8	24	35
0	-1	1	62.9	17	25
0	1	1	73.6	14	26
0	0	0	62.9	28	28
0	0	0	62.9	27	22
0	0	0	62.9	20	19



Figura 3 - Aspecto geral do SBM 011 após o teste balístico: (a) frente; (b) fundos.

O trauma medido variou de 9 mm para a configuração 101, para 57 mm para o 011. A fratura da camada de alumínio de apoio ocorreu para as configurações de 110, 101, 011, como pode apresentado na Fig. 4. Em todas as amostras fraturadas, as placas de compósito e alumínio foram danificadas apenas em uma pequena área ao redor do impacto do projétil. A fratura da placa de apoio de alumínio indica que a liga 5052 H34 não possui ductilidade suficiente para resistir a traumas balísticos acima de 37 mm.

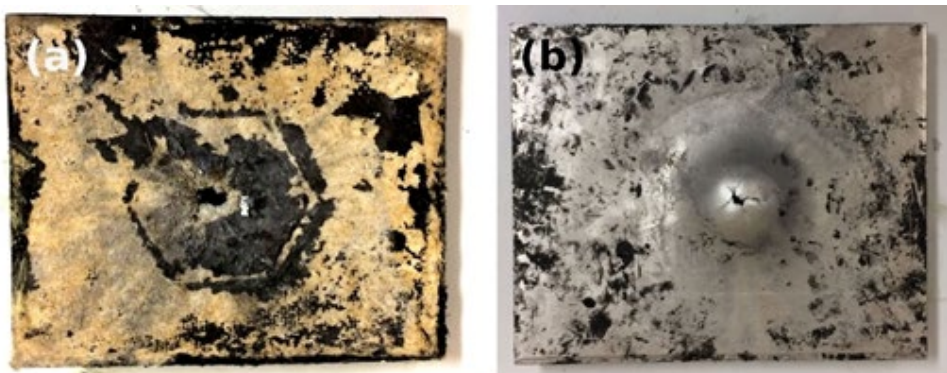


Figura 4 - Aspecto geral do SBM 110 após o teste balístico: (a) frente; (b) fundos.

3.2. Análise de variância (ANOVA) e análise de regressão múltipla (MRA)

Os resultados da Tabela 2 foram tratados usando ANOVA e MRA. A Tabela 3 mostra a ANOVA da regressão. Na Tabela 3, a estatística F é o parâmetro da distribuição de Snedecor, enquanto F_c é seu valor crítico.

Tabela 3 - Estatística e análise de variância (ANOVA) do MRA.

Estatística					
R^2	0,843	Erro padrão	5,28	Espaço amostral	30
ANOVA					
	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F	F_c
Regression	7	$3,30 \times 10^3$	472	16,90	$1,66 \times 10^{-7}$
Residue	22	$6,14 \times 10^2$	27,3		
Total	29	$3,92 \times 10^3$			

O ajuste linear $R^2 = 0,843$ na Tabela 3 significa que 84,3% da variação do trauma pode ser explicado pela variação da espessura. Como $F > F_c$, pode-se concluir que a espessura das camadas influencia fortemente o trauma.

A Tabela 4 mostra os coeficientes obtidos para o MRA. Conforme descrito pela Eq. 3, os coeficientes b_1 , b_2 e b_3 representam a contribuição linear de cada camada para a absorção do trauma. Os coeficientes b_4 , b_5 e b_6 representam a interação entre as camadas. Os coeficientes b_7 , b_8 e b_9 representam a contribuição quadrática das camadas. Os coeficientes b_7 e b_8 não são mostrados na Tabela 4 porque não foram estatisticamente significativos. Seus valores de p foram maiores que 0,1%, o que foi considerado como nível de significância.

Tabela Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento. **4 - Coeficientes do MRA para os resultados do trauma**

Coeficiente	Valor	Erro padrão	p-valor (%)
a	+24.21	1.41	3.25×10^{-14}
b_1	-7.53	1.32	9.81×10^{-5}
b_2	-4.55	1.32	2.31×10^{-3}
b_3	-9.31	1.32	4.54×10^{-7}
b_4	+3.48	1.87	7.62×10^{-2}
b_5	+4.29	1.87	3.16×10^{-2}
b_6	+5.85	1.87	4.85×10^{-3}
b_9	+4.64	1.93	2.54×10^{-2}

Usando as informações da Tabela 4, o modelo de MRA que melhor representa o sistema é Eq. 5:

$$\begin{aligned}
 \text{Trauma} (c_1, c_2, c_3) = & (24.21 \pm 1.41) + (-7.53 \pm 1.32) c_1 + (-4.55 \pm 1.32) c_2 + (-9.31 \\
 & \pm 1.32) c_3 \\
 & + (3.48 \pm 1.87) c_1 c_2 + (4.29 \pm 1.87) c_1 c_3 + (5.85 \pm 1.87) c_2 c_3 + (4.64 \pm 1.93) \\
 & c_3^2.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Os dados da Eq. 5 foram plotados na Fig. 5 para melhor visualização

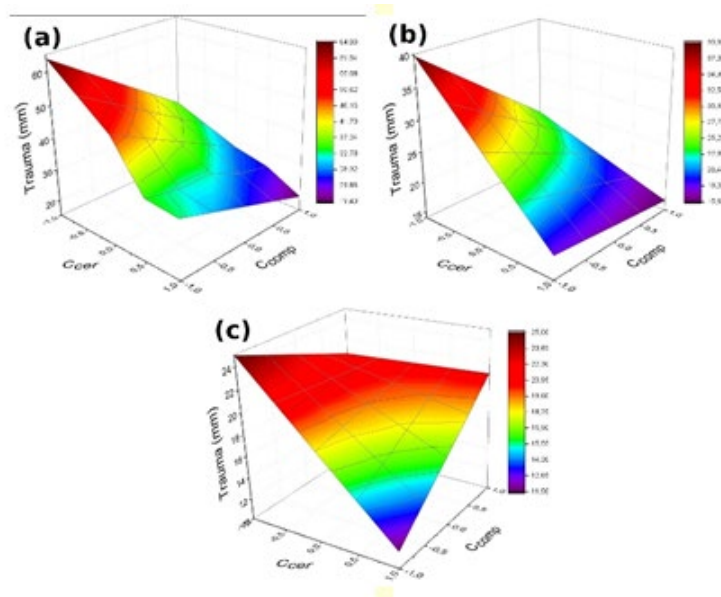


Figura 5 - Resposta do trauma em função da espessura codificada C1 e C2: (a) C3 fixado em -1; (b) C3 fixado em 0; (c) C3 fixado em +1.

Eq. 5 e Fig. 5 mostram algumas características importantes sobre o SBM. A contribuição individual da cerâmica ($b_1 = -7,53$) para o trauma global foi significativa, mas foi menor que a contribuição da camada de alumínio ($b_3 = -9,31$ e $b_9 = +4,64$). Isto indica uma maior importância da deformação plástica do alumínio para a absorção do trauma. A influência do compósito ($b_2 = -4,55$) também foi significativa. Como investigado anteriormente, em um SBM com camada frontal cerâmica, a principal característica da segunda camada é a capacidade de “captura de fragmentos” do material [24].

Embora a camada cerâmica tenha um coeficiente MRA menor que o alumínio, sabe-se que a frente cerâmica é capaz de fragmentar a ponta do projétil, espalhando a pressão de impacto para uma área maior. Isto significa que, embora um aumento na espessura da camada de alumínio possa ser vantajoso, a espessura da cerâmica deve ser mantida acima de um mínimo para garantir a fragmentação da ponta.

A interação entre as camadas foi identificada e quantificada pelos coeficientes de MRA b_4 , b_5 e b_6 . Isso pode ser atribuído à propagação de ondas de choque e à reflexão nas interfaces do SBM. O fenômeno é comum em blindagens balísticas, já que cada camada possui diferentes impedâncias de choque. A onda de choque reflete nas interfaces e retorna como tensão ou ondas de compressão dependendo da impedância de choque dos materiais. A impedância de choque é uma propriedade do meio que depende da densidade do material e da velocidade das ondas de choque [25].

Outra característica é a interação entre o alumínio com 7 mm de espessura e a espessura do compósito c_2 . Nessas configurações, o aumento de c_2 causa um aumento no trauma, embora o contrário aconteça no outro SBM. A explicação pode ser a maior impedância de choque do alumínio, o que torna mais difícil para o compósito absorver a energia de impacto por um mecanismo de quebra de matriz [16].

Substituindo Eq. 1 na Eq. 5, é possível obter o modelo de MRA nas variáveis originais, a espessura das camadas. É mostrado pela Eq. 6:

$$\text{Trauma}(t_1, t_2, t_3) = (321.28 \pm 18.71) + (-19.12 \pm 3.35)t_1 + (-11.14 \pm 3.23)t_2 + (-34.23 \pm 4.85)t_3 + (0.87 \pm 0.47)t_1t_2 + (1.07 \pm 0.47)t_1t_3 + (0.59 \pm 0.19)t_2t_3 \quad (6)$$

$$t_2 t_3 + (1.16 \pm 0.48) t_3^2.$$

3.3. Ajuste linear simples (SLA)

A Figura 6 mostra o resultado do ajuste linear simples (SLA) realizado na configuração 000.

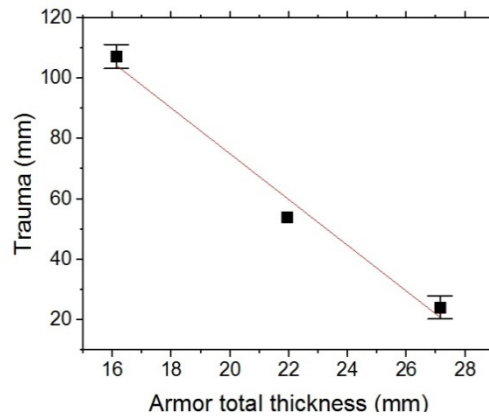


Figura 6 - Ajuste linear simples (SLA) da configuração 000

A interpolação linear resultou na linha vermelha da Fig. 8, descrita pela Eq. 7:

$$Trauma (T) = (-7.58 \pm 0.96)t_T + (226.52 \pm 21.40), \quad (7)$$

onde: t_T é a espessura total

De acordo com a Fig. 6, a espessura total para atingir o trauma de 44 mm é de 24,0 mm.

3.4. Índice de peso de trauma e otimização de espessura BBD-MRA

Para a comparação entre as diferentes configurações de espessura, foi definido um índice de desempenho denominado Trauma-Weight Index (TWI), pela seguinte equação:

$$TWI = \left(\frac{44 \text{ mm}}{Trauma} \right) \left(\frac{100}{D_{Sup}} \right), \quad (8)$$

onde: D_{sup} é a densidade superficial do SBM; T = valor do trauma calculado usando o modelo da Eq. 5. O TWI foi então obtido pela Eq. 8 para cada configuração e um modelo de MRA poderia ser desenvolvido, como mostrado na Eq. 9. A Figura 7 é um gráfico da Eq. 9 fixando c_2 em -1. Este valor de c_2 foi devido à interação já mencionada com a camada de alumínio.

$$TWI(c_1, c_2, c_3) = (2.89 \pm 0.13) + (0.45 \pm 0.08) c_1 + (0.60 \pm 0.08) c_3 + (-0.23 \pm 0.20) c_2 c_3 + (-0.29 \pm 0.12) c_3^2 \quad (9)$$

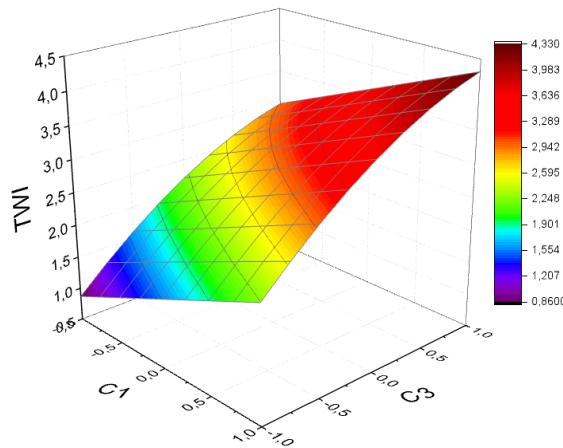


Figura 7 - Resposta TWI em função da espessura codificada c_1 e c_3 , com c_2 fixado em -1.

A Figura 7 mostra que as melhores configurações de espessura são vistas para os mais altos níveis de cerâmica e alumínio. Para o presente trabalho, a configuração com o maior TWI é o 1 $\bar{1}$ 1.

De acordo com a Norma NIJ 0101.06, o trauma não pode ser maior 44 mm. O trauma calculado para o 1 $\bar{1}$ 1 usando a Eq. 5 seria de 12 mm, então o SBM poderia ter sua espessura diminuída, visando um D_{sup} menor. Mantendo a mesma relação de espessura (1 $\bar{1}$ 1), a Eq. 9 foi resolvido para 44 mm, e o resultado da espessura pode ser visto na Tabela 5, em comparação com o resultado do SLA. De acordo com os dados da Tabela 5, a metodologia BBD-MRA proporciona uma redução de 8,3% na espessura do SBM e de 1,3% na densidade superficial total quando comparada à SLA. Isso representa uma diminuição na espessura do SBM, mantendo o desempenho mínimo especificado pelo NIJ-0101.06.

A Tabela 5 mostra também uma comparação do SBM com um laminado de tecido de aramida estudado em um trabalho anterior [26]. Embora o tecido de aramida seja ligeiramente mais leve do que o SBM otimizado, sua espessura de 50 mm para parar os 7,62 mm pode ser impraticável para aplicações de blindagem pessoal [26].

Tabela 5 - Espessura otimizada do SBM por dois métodos diferentes e comparação com laminados de tecido de aramida de um trabalho anterior [26].

Método	t_1 (mm)	t_2 (mm)	t_3 (mm)	t_r (mm)	D_{sup} (kg/m ²)
SLA	9,5	10,4	4,1	24,0	55,7
BBD-MRA	5,9	5,5	10,5	21,9	55,0
Material	t_r (mm)				D_{sup} (kg/m²)
Tecido de Aramida laminado	50				54,0

É importante notar, no entanto, que os resultados da otimização da espessura devem ser utilizados com cautela, pois o modelo BBD-MRA descreve a influência das camadas no comportamento SBM dentro do intervalo estudado, que envolve a espessura mínima cerâmica e do compósito de 8,5 e 6,5 mm, respectivamente, e alumínio com espessura máxima de 7 mm. Por outro lado, este modelo é uma das primeiras tentativas de otimizar um SBM.

4 SUMÁRIO E CONCLUSÃO

No presente trabalho, sistemas de blindagem de multicamadas (SBM) com frente de cerâmica de alumina seguida por compósito reforçado com manta de curauá e liga de alumínio foram investigados. As conclusões são apresentadas:

- Através do Box-Behnken Design (BBD) e da Análise de regressão múltipla (MRA), foi possível avaliar a contribuição de cada camada do SBM para o seu desempenho global. Em termos de absorção do trauma, a camada de alumínio apresentou maior importância que as outras camadas, de acordo com seus coeficientes de MRA. No entanto, a investigação dos mecanismos de fratura mostrou a importância da camada cerâmica na fragmentação da ponta do projétil, bem como o compósito na coleta desses fragmentos.
- Dentro da faixa de espessura estudada, foi possível obter a melhor configuração para proteção contra os projéteis de 7,62 mm, o que acontece para a maior espessura da cerâmica e alumínio, e espessura mínima do compósito de curauá. Essas configurações maximizam o desempenho com densidade superficial mínima.
- Os resultados do BBD-MRA foram comparados com um ajuste linear simples da configuração de 10 mm de cerâmica, ~ 10 mm de compósito, 5 mm de espessura de alumínio. Uma redução de 8,8% na espessura e de 1,3% na densidade superficial pode ser observada. Em comparação com um laminado de aramida anterior estudado, a diferença na espessura foi ainda mais significativa, 56%, embora a densidade superficial seja ligeiramente maior.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer às agências financiadoras brasileiras CNPq e CAPES pelo apoio financeiro, e às pessoas do CAEx pela realização dos testes balísticos.

REFERÊNCIAS

- 1 Roser, M. War and Peace. Institute for New Economic Thinking. Available online: <https://ourworldindata.org/war-and-peace#the-number-of-wars-increased-until-the-end-of-the-cold-war> (accessed on 16 Jan. 2018).
- 2 Ragsdale, B.; Sohn, S. J. Forensic Sci. 1988, Vol. 33, No. 3, pp. 676-696.
- 3 Jiusti, J.; Kammer, E.H.; Neckel, L.; Löh, N.J.; Trindade, W.; Silva, A.O.; Montedo, O.R.K.; De Noni Jr., A. Ceram. Int. 2017. Vol. 43, pp. 2697-2704.
- 4 Medvedovski, E. Adv. Appl. Ceram. 2006, Vol. 105, No. 5, pp. 241-245.
- 5 Medvedovski, E. Ceram. Int. 2010, Vol. 36, pp. 2103-2115.
- 6 Salamé, J.M.; Quefelec, B. Ceramic-faced molded armor. In Lightweight ballistic composites, 1st ed., Bhatnagar A., Ed. Woodhead Publishing: Cambridge, England, 2006; pp. 398-415.
- 7 Wang, L.; Kanesalingam, S.; Nayak, R.; Padhye, R. Textiles and Light Industrial Science and Technology
- 8 Akella, K.; Naik, N.K. JI of IISc 2015, Vol. 95, No. 3, pp. 297-312.
- 9 Mobasser, A.A.; Ansari, A.R.; Zarei, H.R.; Sadighi, M.; Mobasser, F. AJBAS 2013. Vol. 6, No. 6, pp. 199-210.
- 10 Monteiro, S.N.; Milanezi, T.L.; Louro, L.H.L.; Lima Jr., E.P.; Braga, F.O.; Gomes, A.V.; Drelich, J.W. Mater. Design 2016, Vol. 96; pp. 263-269.
- 11 Monteiro, S.N.; Candido, V.S.; Braga, F.O.; Bolzan, L.T.; Weber, R.P.; Drelich, J.W. Eur. Polym. J. 2016, Vol. 78, pp. 173-185.
- 12 Güven, O.; Monteiro, S.N.; Moura, E.A.B.; Drelich, J.W. Polymer Reviews 2016, Vol. 56, No. 4, pp. 702-736.

- 13 Monteiro, S.N.; Lopes, F.P.D.; Nascimento, D.C.O.; Ferreira, A.S.; Satyanarayana, K.G. J. Mater. Res. Technolol. 2013, Vol. 2, No. 1, pp. 2-9.
- 14 Mano, B.; Araújo, J.R.; Spinacé, M.A.S.; De Paoli, M.A. Compos. Sci. Technol. 2010. Vol. 70, pp. 29-35.
- 15 Monteiro, S.N.; Braga, F.O.; Lima, E.P.; Louro, L.H.L.; Drelich, J.W. Polym. Eng. Sci. 2017, Vol. 57, No. 9, pp. 947-954.
- 16 Braga, F.O.; Bolzan, L.T.; Lima Jr., E.P.; Monteiro, S.N. J. Mater. Res. Technolol. 2017, Vol. 6, No. 4, pp. 323-328.
- 17 Braga, F.O.; Bolzan, L.T.; Luz, F.S.; Machado Lopes, P.H.L.; Lima Jr., E.P.; Monteiro, S.N. J. Mater. Res. Technolol. 2017, Vol. 57, No. 9, pp. 947-954.
- 18 Braga, F.O.; Bolzan, L.T.; Luz, F.S.; Lopes, P.H.L.M.; Lima Jr., E.P.; Monteiro, S.N. J. Mater. Res. Technolol. 2017, Vol. 57, No. 9, pp. 417-422.
- 19 Monteiro, S.N.; Lopes, F.P.D.; Barbosa, A.P.; Bevitori, A.B.; Silva, I.L.A.; Costa, L.L. Metall. Mater. Trans. A 2011, Vol. 42A, pp. 2963-2974.
- 20 NIJ Standards 0101.06. Ballistic Resistance of Body Armor. Washington: National Institute of Justice (NIJ). 2008.
- 21 Box, G.E.P.; Behnken, D.W. Technometrics 1960, Vol. 2, No. 4, pp. 455-475.
- 22 Akubue, P.C.; Igbokwe, P.K.; Nwabanne, J.T. IJSER 2015, Vol. 6, No. 8, pp. 1-7.
- 23 Bezerra, M.A.; Santelli, R.E.; Oliveira, E.P.; Villar, L.S.; Escaleira, L.A. Talanta 2008, Vol. 76, pp. 965-977.
- 24 Monteiro, S.N.; Lima Jr., E.P.; Louro, L.H.L.; Silva, L.C.; Drelich, J.W. Metall. Mater. Trans. A. 2014, Vol. 46, No. 1, pp. 37-40.
- 25 Meyers, M.A. Dynamic Behavior of Materials, 1st ed., John Wiley & Sons: New York, USA, 1994.
- 26 Braga, F.O.; Lima Jr., E.P.; Lima, E.S.; Monteiro, S.N. Mater Res. [on-line] 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0883>.