

ANÁLISE DO DESEMPENHO BALÍSTICO DAS CERÂMICAS PRODUZIDAS COM E SEM FLUORTETO DE LÍCIO*

*Luana Cristyne da Cruz Demosthenes¹
Michelle Souza Oliveira²
Fabio da Costa Garcia Filho³
Fernanda dos Santos Luz⁴
Sergio Neves Monteiro⁵
Lucio Fabio Cassiano Nascimento⁶*

Resumo

O aumento da criminalidade impulsiona pesquisadores a buscarem alternativas para melhorar os equipamentos destinados a segurança pessoal de civis e militares, através de materiais que mantenham a eficiência da proteção balística, no entanto, possibilitem a manutenção da adequada mobilidade, além de possuírem custos competitivos com os atuais materiais utilizados em proteção individual. Em vista disso, a presente pesquisa tem por objetivo avaliar a presença do Fluoreto de Lítio nas cerâmicas que compõe um sistema de blindagem multicamada (SBM). Os SBMs são compostos, geralmente, por três camadas de materiais distintos e a primeira camada é composta por uma cerâmica que tende absorver, em torno de 55% da energia, e a fragmentar o projétil. Portanto, foram produzidas as amostras cerâmicas de Alumina (Al_2O_3) e Nióbia (Nb_2O_5) e foram comparadas com as cerâmicas dopadas com Fluoreto de Lítio (LiF). A presença do LiF apresenta uma melhor densificação e produz uma ligeira mudança na morfologia das partículas. Além disso, notou-se que a presença do LiF na blindagem balística produz uma indentação maior quando comparada com as cerâmicas sem o composto. Entretanto, por maior que fosse à indentação, ainda sim os resultados foram satisfatórios com o que preconiza na norma, NIJ 0101.04 isto é, uma indentação inferior a 44 milímetros.

Palavras-chave: Cerâmica; Alumina; Fluoreto de Lítio; Blindagem balística.

ANALYSIS OF THE BALLISTIC PERFORMANCE OF CERAMICS PRODUCED WITH AND WITHOUT LITHIUM FLUORTURE

Abstract

The increase in crime prompts researchers to seek alternatives to improve equipment for the personal safety of civilians and soldiers, through materials that maintain the efficiency of ballistic protection, however, allow the maintenance of adequate mobility, and have competitive costs with materials used for individual protection. In view of this, the present research aims to evaluate the presence of Lithium Fluoride in the ceramics that makes up a multilayer armor system (MAS). MASs are generally composed of three layers of distinct materials and the first layer consists of a ceramic that tends to absorb about 55% of the energy and to fragment the projectile. Therefore, the ceramic samples of Alumina (Al_2O_3) and Nióbia (Nb_2O_5) were produced and compared with the ceramics doped with Lithium Fluoride (LiF). The presence of LiF exhibits better densification and produces a slight change in the morphology of the particles. Furthermore, it has been noted that the presence of LiF in ballistic armor produces a greater indentation when compared to ceramics without the compound. However, however large the indentation, the results were still satisfactory with what is stated in the standard, NIJ 0101.04 ie an indentation of less than 44 millimeters.

Keywords: Ceramics; Alumina; Lithium Fluoride; Ballistic Shielding.

- ¹ *Engenheira Civil, Mestre, Doutoranda em Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. eng.luanademosthenes@gmail.com.*
- ² *Engenheira Civil, Mestre, Doutoranda em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ³ *Engenheiro de Materiais, Mestre, Doutorando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ⁴ *Engenheira de Materiais, Doutora em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.*
- ⁵ *Engenheiro Metalurgista, Ph.D, Professor Titular, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ⁶ *Engenheiro Metalurgista, D.C, Professor Titular, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil..*
- ⁷

1 INTRODUÇÃO

O aumento da violência impulsiona os pesquisadores a criarem materiais que resistam aos mais diversos artefatos e ameaças [1-3]. Dentre tais materiais, destaca-se o Sistema de Blindagem Multicamadas (SBMs), que são materiais compostos por três camadas distintas que apresentam características específicas para resistir ao impacto de munição de fuzil 7,62 mm (Figura 1). A primeira camada é um material duro e frágil que tem o intuito de absorver energia e fragmentar o projétil [4]. Como segunda camada é utilizado um material com densidade menor que o cerâmico e que têm o intuito de absorver uma parcela significativa da energia cinética produzida pelos estilhaços, tanto do cerâmico quanto do projétil [5]. A terceira camada é composta por uma chapa de alumínio que possui característica dúctil, com capacidade de deformar plasticamente e reter possíveis fragmentos, remanescentes do projétil e camadas anteriores [6-7].

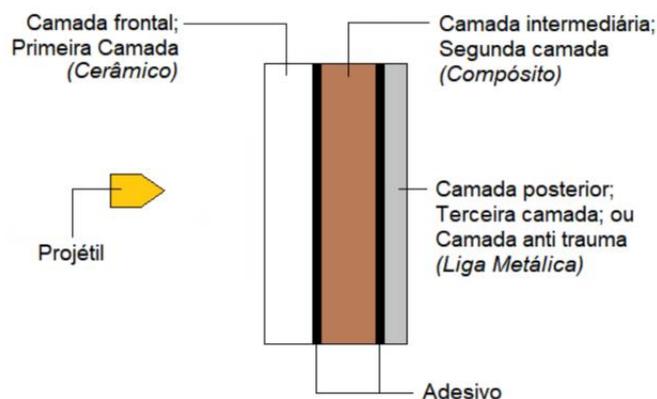


Figura 1 - Esquema de um Sistema de Blindagem Multicamada (SBM) antes do impacto do projétil.

As cerâmicas utilizadas na blindagem multicamada são as classificadas como avançadas que são preparadas de forma a possuírem propriedades excepcionais, sejam elas mecânicas, térmicas, elétricas, magnéticas ou óticas adequadas para aplicações de engenharia [8]. Além disso, as cerâmicas precisam ter propriedades como alta dureza, resistência mecânica, rigidez e resistência a compressão, pois essa camada é responsável pela absorção de um percentual significativo, em torno de 55%, da energia cinética inicial do projétil [9-12].

Os materiais cerâmicos usados em SBM podem ser formados por composições de carbeto de silício (SiC), carbeto de boro (B_4C), óxido de ítrio (Y_2O_3), nitreto de silício (Si_3N_4) e os mais utilizados atualmente, em função da sua ótima relação custo-benefício, são o óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3), normalmente aditivada com nióbia (Nb_2O_5) e, nesta pesquisa também adicionado o Fluoreto de Lítio (LiF). As cerâmicas produzidas com alumina e nióbia possuem as características de reduzir o tempo de sinterização, podem ser utilizadas em ambientes abrasivos e corrosivos. A realização do processamento cerâmico compreende uma série de etapas necessárias para a obtenção de um determinado produto com propriedades específicas e características desejadas, Figura 2, e essas etapas estão apresentadas nos materiais e métodos da presente pesquisa.

A camada secundária do SBM é formada por um compósito reforçado com tecido de buriti, no qual a matriz consiste em uma resina epóxi e a fase dispersa é composta pelo tecido de buriti nos teores de 10, 20 e 30% em volume. A camada terciária é composta por uma chapa de liga de alumínio 5052 H34. Entretanto, o

objetivo da presente pesquisa foi verificar o comportamento do LiF na blindagem balística e verificar se a presença do composto melhoraria as propriedades de absorção de energia do projétil de 7,62mm.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A cerâmica utilizada na presente pesquisa consistiu na produção de um grupo amostral de cerâmica de Alumina (Al_2O_3) dopada com Nióbia (Nb_2O_5) e outro grupo amostral com estes dois componentes aditivadas com o Fluoreto de Lítio (LiF). A sequência para a obtenção da pastilha cerâmica está ilustrada na Figura , na qual o fluxograma apresenta de forma resumida cada etapa do processamento.



Figura 2 - Fluxograma do processamento cerâmico.

A primeira etapa, obtenção dos pós cerâmicos, consiste na adição dos constituintes nas seguintes concentrações:

- Alumina (700 g – 94,5%p);
- Nióbia (29,15 g – 3,94%p);
- Álcool etílico hidratado 92,8º INPM (750ml) para possibilitar a mistura dos pós;
- Fluoreto de Lítio (3,702 g - 0,5%);
- Ligante líquido PEG 400 (11,3 g – 1,53%).

O PEG foi aquecido a 70°C para facilitar a mistura com os demais componentes e para potencializar as propriedades do ligante [13]. Os materiais foram colocados em um moinho de bolas durante um período de 8h para homogeneizar a mistura. Posteriormente foram colocados na estufa para secar a uma temperatura de 100°C por um período de 24h. A mistura foi retirada da estufa e, com o auxílio do almofariz e pistilo, iniciou o processo de macerar a massa cerâmica

até obter um pó. Na sequência, os pós foram colocados na peneira de abertura de 0,255 mm com o auxílio de um agitador mecânico.

Em seguida, com granulometria definida, os pós foram colocados dentro de uma matriz hexagonal metálica. Com o auxílio de uma prensa hidráulica da marca SKAY, com capacidade de 30 toneladas, aplicou-se uma carga de 30 MPa (12 T) com isso foram obtidos os corpos verdes (CV). Os corpos verdes foram colocados em um forno da marca INTI modelo FE-1700 para serem sinterizados. A quantidade de pó utilizada nessa pesquisa foi equivalente a estudada por Santos (2017) e Trindade (2012), em que após sinterização, cada amostra tivesse 10mm de espessura. O forno foi ajustado nas taxas e patamares discriminados abaixo e ilustrado na Figura 3. Os patamares representam a eliminação do ligante, potencialização do aditivo desinterização LiF e sinterização total da alumina com nióbia, respectivamente.

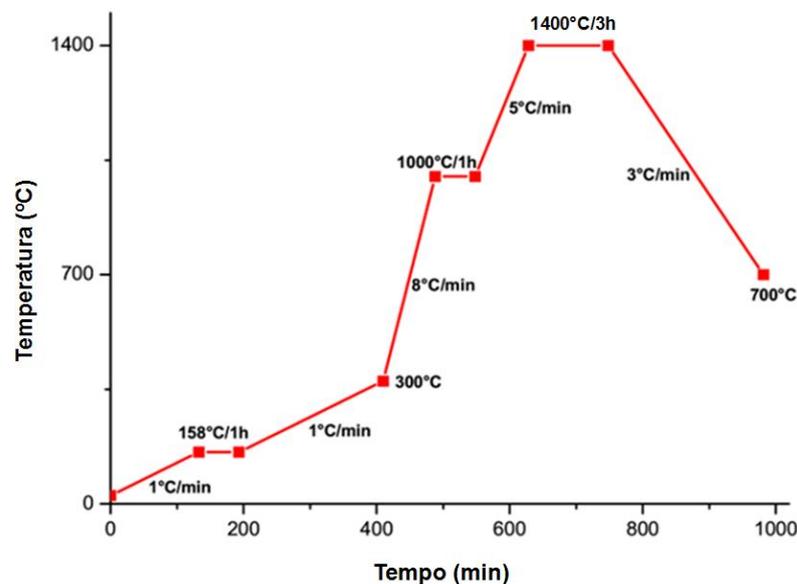


Figura 3 - Ciclos, taxas e patamares de aquecimento para sinterização das cerâmicas.

Após a sinterização, as amostras foram submetidas ao ensaio de Arquimedes, de acordo com a norma ABNT NBR 16667:2017, com o intuito de calcular a densidade aparente e então a densificação com base na densidade teórica. A densidade aparente (ρ_{ap}) e a densificação ($dens\%$) foram calculadas conforme as equações 1 e 2, em que ρ_{liq} corresponde à densidade da água utilizada no ensaio, considerada como 1,0 g/cm³. A densidade teórica adotada para a composição da cerâmica dopada com LiF foi de 3,9980 (g/cm³) e a densidade teórica adotada para a composição da cerâmica sem o LiF foi de 4,0048 (g/cm³) [5].

$$\rho_{ap} = \frac{ms}{mu - mi} \rho_{liq} \quad (1)$$

$$Densif (\%) = \frac{\rho_{ap}}{V_{ap}} \quad (2)$$

Os ensaios balísticos utilizados nessa pesquisa são baseados na NBR 15000 e na NIJ 0101.04. As amostras submetidas aos ensaios balísticos tiveram como objetivo medir a indentação provocada na plastilina após o impacto do projétil. De

acordo com a NIJ 0101.04, essa indentação deve ser inferior ou igual a 44 mm para ser considerada eficiente e evitar danos letais ao ser humano.

Os testes balísticos foram realizados nas seguintes condições:

- I. Munição: Calibre 7,62 mm M1, com massa de 9,7 gramas;
- II. Dispositivo: Provete calibre 7,62 mm e um dispositivo de fixação do alvo;
- III. Distância do alvo: 15 metros, conforme previsto na norma ABNT NBR 15000 para as munições 7,62 mm;
- IV. A incidência no alvo foi de um ângulo de 90°;
- V. Local: Centro de Avaliações do Exército (CAEx).

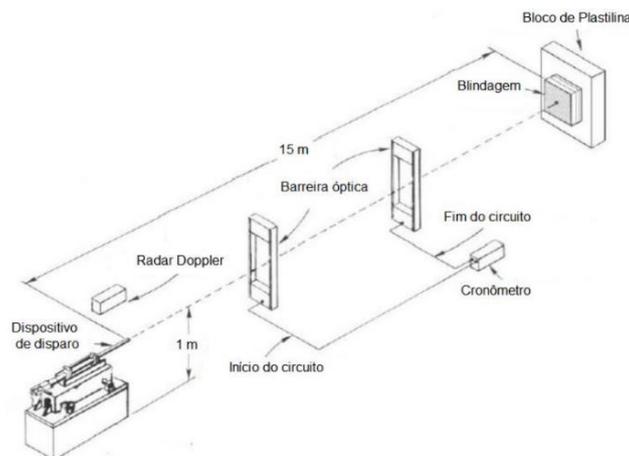


Figura 1 - Esquema do sistema utilizado no ensaio balístico.

Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente pela Análise de Variância (ANOVA) para afirmar com 95% de confiança se as amostras apresentavam diferenças entre elas. Após essa análise, os valores médios foram comparados pelo teste de Tukey, também chamado de diferença mínima significativa (d.m.s.) e calculado pela seguinte equação:

$$d. m. s. = q * \sqrt{\frac{QMR}{r}}$$

(Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.)

Onde q é a constante de d.m.s. considerada para significância de 5%; QMR é o quadrado médio do resíduo da ANOVA; r é o número de repetições de cada um dos tratamentos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Densificação dos corpos cerâmicos

A densificação dos corpos cerâmicos foram realizadas nas amostras com 5mm de diâmetro e foram fabricadas 5 pastilhas cerâmicas para calcular a densidade e a densificação das amostras. Os resultados obtidos por meio do ensaio

de Arquimedes para as cerâmicas dopadas com LiF e sem o composto estão apresentados na Tabela 1. Os dados foram comparados com outros autores para verificar a coesão dos valores.

Tabela 1 - Densidade e densificação das amostras cerâmicas.

Amostras	Al ₂ O ₃ + Nb ₂ O ₅		Al ₂ O ₃ + Nb ₂ O ₅ + LiF	
	Densidade (g/cm ³)	Densificação (%)	Densidade (g/cm ³)	Densificação (%)
PT*	3,373	84,09	3,354	91,14
LUZ, 2014	3,510	87,65	-	-
JESUS, 2014	3,567	89,07	3,715	93,08
BRAGA, 2018	3,330	82,73	-	-
SANTOS, 2016	3,675	91,75	3,757	93,98

PT* - Presente Trabalho

A adição do LiF apresenta um valor de 7% na densificação das pastilhas cerâmicas, ainda assim os dados foram tratados estatisticamente pela análise de variância para dizer com confiança se eles são diferentes. A Tabela apresenta os dados tratados estatisticamente pela ANOVA para a densificação das amostras.

Tabela 2 - Análise estatística da densificação das pastilhas cerâmicas com e sem LiF.

Causas de variação	GL	SQ	QM	F _{calc}	F _{crítico}	dms
Tratamentos	1	124	124	160,11	5,32	
Resíduo	8	6	1	-	-	1,16
Total	9	131	-	-	-	

A partir dos resultados obtidos na análise de variância da Tabela rejeita-se a hipótese de que as médias das densificações sejam iguais, com 95% de confiança, uma vez que o F_{calc} >> F_{crítico}. Ou seja, como esperado, a presença do composto de Fluoreto de Lítio influencia na densificação das pastilhas cerâmicas. Por este motivo, aplicou-se o teste de Tukey para comparação de médias. A diferença média significativa (d.m.s) encontrada foi de 1,16. E as diferenças médias entre as cerâmicas foram de 7,06, ou seja, pela análise de teste Tukey afirma que com nível de significância de 5%, que a presença do LiF, apresentou melhor densificação, pois exibiu maior valor de densificação média (91,14%), sendo significativamente diferente da pastilha sem LiF, pois as diferenças encontradas são superiores ao d.m.s (1,16).

A fim de analisar a morfologia das pastilhas cerâmicas sinterizadas e a característica de fratura do corpo cerâmico, foram realizadas análises de MEV, antes e após o ensaio balístico. A Figura apresenta as micrografias obtidas para as pastilhas cerâmicas sinterizadas com e sem o LiF.

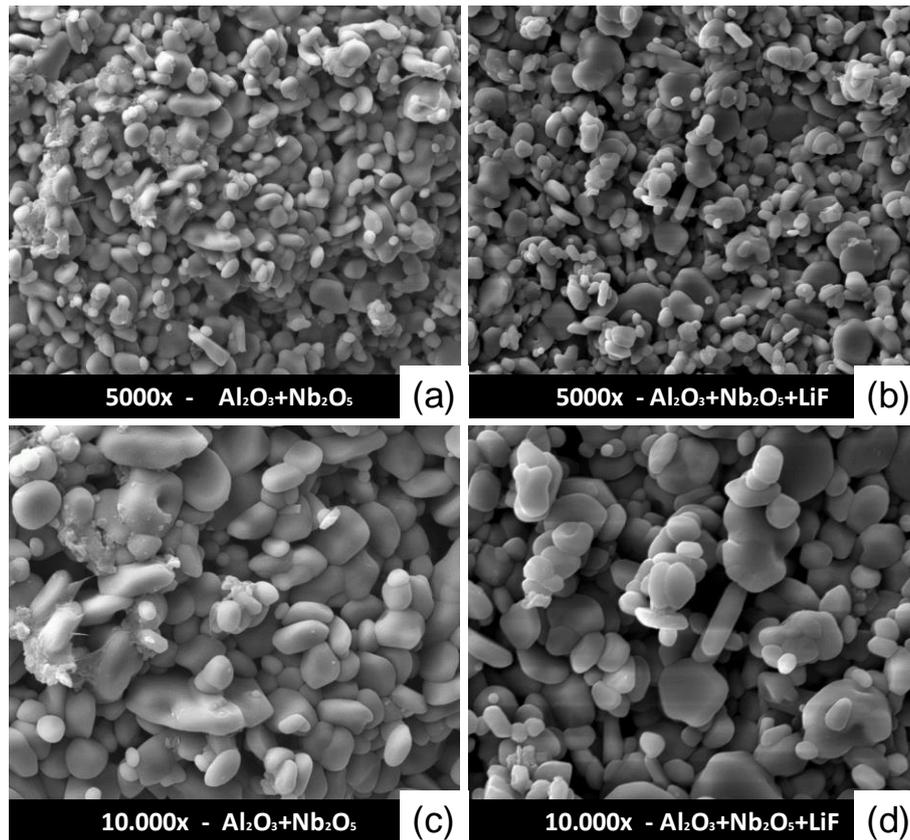


Figura 5 - Micrografia das composições cerâmicas estudadas com um aumento de (a) 5.000X e (b) 10.000X.

De acordo com SANTOS (2017), a presença do LiF diminui o tamanho dos grãos e produz uma morfologia mais arredondada. Em vista disso, foram medidos os tamanhos das partículas cerâmicas nas amostras com e sem LiF para afirmar se as pastilhas produzidas nessa pesquisa possuem a mesma característica. A Tabela apresenta os valores obtidos para os tamanhos das partículas analisadas.

Tabela 3 - Tamanho das partículas cerâmicas com e sem LiF.

Amostra	Tamanho das partículas (μm)	
	Sem LiF	Com LiF
1	2822,12	4649,65
2	3073,46	3673,03
3	3225,65	5396,73
4	2219,18	3682,57
5	3096,67	4476,71
6	2711,74	5802,79
7	3711,82	2108,42
Média	2980,091	4255,700
Desvio Padrão	464,40	1236,82

Os dados foram tratados estatisticamente para afirmar, com 95% de confiança, se possuíam diferenças entre as amostras. A Tabela apresenta os dados obtidos nas medições das partículas com os respectivos tratamentos da ANOVA.

Tabela 4 - Análise estatística das medidas dos TP das pastilhas cerâmicas com e sem LiF.

Causas de variação	GL	SQ	QM	F calc	F crítico	dms
Tratamentos	1	5695120	5695120	6,53	4,67	1.038,63
Resíduo	12	10472260	872688			
Total	13	16167381				

Com base nos resultados obtidos na análise de variância, rejeita-se a hipótese de que as médias dos TPs sejam iguais com nível de significância de 5%, visto que $F_{calc} > F_{crítico}$. Isto é, as partículas cerâmicas produzidas com LiF alteram o tamanho da partícula. Por esse motivo aplicou-se o teste Tukey na comparação das médias. A d.m.s. encontrada foi de 1038,63 mm. Os resultados obtidos para as diferenças entre os valores médios dos TP foram de 1.275,61 mm entre as pastilhas cerâmicas com e sem fluoreto de lítio, portanto conclui-se que há diferença nos TP das amostras.

As amostras foram submetidas ao ensaio balístico e, após o ensaio, foram realizadas análises de MEV nas pastilhas cerâmicas para caracterizar a superfície de fratura nas pastilhas. A Figura apresenta, pelas setas em vermelho, a superfície de fratura após o ensaio balístico destacando a característica de fratura intergranular.

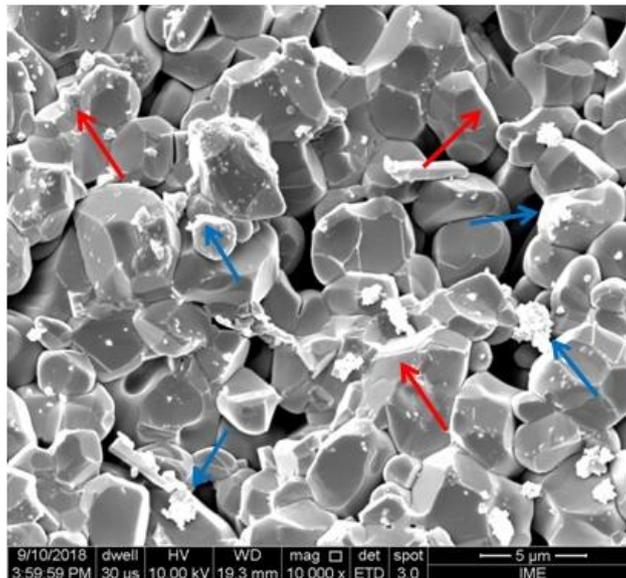


Figura 6 - Micrografia da amostra cerâmica sem LiF após o ensaio balístico, com um aumento de 10000x.

Ainda de acordo com a Figura é possível identificar, pelas setas azuis, que os contornos dos grãos possuem uma coloração esbranquiçada, tal característica ocorre por causa do Alumínio, Nióbio e Oxigênio que tendem a formar um composto de $AlNbO_4$ gerando assim uma 2ª fase no contorno do grão [8, 13-14]. Ademais, as cerâmicas produzidas com o LiF mostram que o flúor tem uma preferência em localizar-se junto com o nióbio [5].

Os ensaios balísticos foram realizados considerando os grupos amostrais com cinco pastilhas cerâmicas produzidas com LiF e cinco cerâmicas sem LiF. As indentações dos SBMs de cada amostra estão apresentadas na Tabela 5, bem como suas respectivas médias e desvios padrões.

Tabela 5 - Indentação na plastilina para os compósitos com camada frontal diferenciadas.

CETB10		CETB20		CETB30	
Sem LiF	Com LiF	Sem LiF	Com LiF	Sem LiF	Com LiF
18,92 ± 1,20	19,73 ± 1,12	21,01 ± 1,81	22,94 ± 1,2	22,53 ± 2,46	27,40 ± 1,8

De acordo com os resultados da

Tabela nota-se que as cerâmicas com a presença do LiF, apesar da sua boa densificação, não favorece a indentação na plastilina. As indentações das cerâmicas com LiF apresentaram um aumento nas médias das leituras, por isso os dados foram tratados estatisticamente pela ANOVA para afirmar se existe diferença entre as amostras com LiF e Sem LiF (Tabela).

Tabela 6 - ANOVA para as leituras da indentação na plastilina para os SBM com a camada frontal diferenciada.

CETB10						
Causas de variação	GL	SQ	QM	F calc	Fcritico	Dms
Tratamentos	1	31,40	31,40	6,64	5,32	2,86
Resíduo	8	37,85	4,73			
Total	9	69,25				
CETB20						
Causas de variação	GL	SQ	QM	F calc	Fcritico	Dms
Tratamentos	1	9,27	9,27	8,75	5,32	1,35
Resíduo	8	8,48	1,06			
Total	9	17,75				
CETB30						
Causas de variação	GL	SQ	QM	F calc	Fcritico	Dms
Tratamentos	1	59,34	59,34	12,65	5,32	2,85
Resíduo	8	37,52	4,69			
Total	9	96,86				

De acordo com os dados obtidos na ANOVA (Tabela) rejeita-se, para todos os casos, a hipótese de que as médias são iguais com nível de significância de 5%, pois pela estatística “F”, para todos os casos o F calculado foi superior ao F crítico. Portanto, a presença do LiF têm efeitos diferentes na indentação da plastilina.

Em especial, para esse caso, não foi utilizado o teste de Tukey por que pela ANOVA já caracterizou que a presença do LiF caracterizava a diferença das amostras, isto é, aumentava as leituras de indentação na plastilina. Entretanto, foram plotados gráficos comparativos das amostras para ilustrar melhor a diferença das indentações. O gráfico está apresentado na Figura .

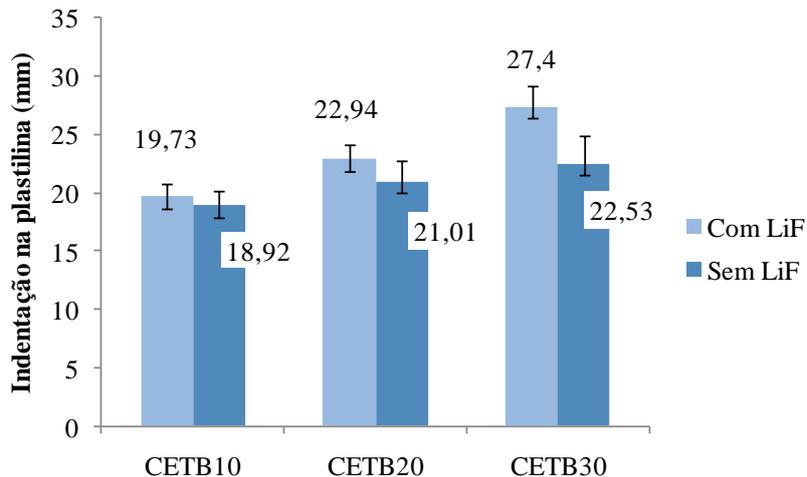


Figura 7 - Comparação da indentação na plastilina para os SBM produzidos com camada frontal diferenciadas.

Com base nos dados da

Tabela e com a facilidade da leitura dos dados pela Figura , pode-se notar que a presença do LiF aumentou a indentação na plastilina em cerca de 5 a 20%, isto é, se analisarmos a indentação do CETB10 produzido com LiF ele apresenta um aumento de aproximadamente 5% na leitura do trauma na plastilina. É passível de achar que esse aumento no CETB10 não é tão significativo, entretanto, se olharmos o CETB30, encontra-se um aumento de aproximadamente 20% e isso é um aumento considerável quando pensamos que esse material será utilizado para uma proteção de uso pessoal e os impactos podem afetar os órgãos internos dos combatentes. Sobreleva-se que mesmo com o aumento na indentação, todos os valores obtidos ficaram bem abaixo do limite estipulado pela NIJ 0101.04, ou seja, todos os valores foram abaixo de 44 mm. Vale salientar que a presença do LiF para este tipo de blindagem, balística, não apresentou características favoráveis, entretanto se analisarmos outras aplicações de blindagem, por exemplo radioativas, é possível que a alta densificação apresente resultados favoráveis.

4 CONCLUSÕES

As cerâmicas produzidas com LiF foram analisadas nas densificações, morfologias e teste balístico, como proposto para essa pesquisa. Notou-se que o LiF apresenta uma ligeira diferença nas densificações, em torno de 7%, e um ligeira mudança na morfologia das partículas.

Todas as amostras foram ensaiadas no teste balístico e por maior que fossem as indentações, ainda foram muito menores do que preconiza a norma (NIJ) de 44 mm de profundidade.

A presença do LiF para blindagens balísticas não possui características favoráveis, entretanto, esse material pode ser utilizado para outros tipos de blindagens, por exemplo, blindagens contra radiações.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro oriundos das agências brasileiras: CNPq, FAPERJ e CAPES; e ao CAEx pela execução dos ensaios balísticos.

REFERÊNCIAS

- 1 Braga FO, Bolzan LT, Lima Jr EP, Monteiro SN. Performance of natural curauá fiber-reinforced polyester composites under 7,62 mm bullet impact as a stand-alone ballistic armor. *Journal of Materials Research and Technology*. 2017; 6(4):323-328.
- 2 Luz FS, Lima Jr. EP, Louro LHL, Monteiro SN. Ballistic test of multilayered armor with intermediate epoxy composite reinforced with jute fabric. *Mater Res*, v.18, 2015, p.170–177.
- 3 Medvedovski E. Ballistic Performance of Armour Ceramics: Influence of Design and Structure - Part 1. *Ceramics International*, v.36, 2010, p.2103-2115.
- 4 Nascimento LFC, Holanda LIF, Louro LHL, Monteiro SN, Gomes AV, Lima Jr EP. Natural mallow fiber-reinforced epoxy composite for ballistic armor against class III-A ammunition. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017; 48(10):4425-4431.
- 5 SANTOS, J. L. Comportamento Balístico De Componente Cerâmico À Base De Al₂O₃-Nb₂O₅-LiF Em Blindagem Multicamada. Tese De Doutorado Em Ciência Dos Materiais. Instituto Militar De Engenharia, Rio De Janeiro. 2016.
- 6 MONTEIRO, S.N.; BRAGA, F.O.; LIMA Jr E.P.; LOURO, L.H.L.; DRELICH, J.W. Promising curaua fiber-reinforced polyester composite for high-impact ballistic multilayered armor. *Polymer Engineering & Science* 2016; 57(9): 947-954.
- 7 MONTEIRO, S.N.; LIMA JR., E.P.; LOURO, L.H.L.; SILVA, L.C.; DRELICH, J.W. Unlocking function of aramid fibers in multilayered ballistic armor. *Metallurgical and Materials Transactions A* 2015; 46(1): 37–40.
- 8 SANTOS, J. L., MARÇAL, R. L., JESUS, P. R., GOMES, A. V., LIMA, E. P., ROCHA, D. N., LOURO, L. Mechanical properties and ballistic behavior of LiF-added Al₂O₃-4wt%Nb₂O₅ ceramics. *Journal of Materials Research and Technology*. 2018.
- 9 Santos JL, Marçal RLSB, Jesus PRR, Gomes AV, Lima Jr. EP, Monteiro SN, De Campos JB, Louro LHL. Effect of LiF as Sintering Agent on the Densification and Phase Formation in Al₂O₃-4 Wt Pct Nb₂O₅ Ceramic Compound. *Metall Mater Trans. A*, v. 48, p. 4432–4440, 2017.
- 10 LOURO, L.H.L.; MEYERS, M.A. Effect of stress state and microstructural parameters on impact damage of alumina-based ceramics. *Journal of Materials Science*, 24; 2516-2532, 1989.
- 11 ANDERSON, C.E.; MORRIS, B.L. The ballistic performance of confined Al₂O₃ ceramic tiles. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 12, pp. 167-187. 10, 1992.
- 12 SHOKRIEH, M.M.; JAVADPOUR, G.H. Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor. *Composite Structures*. v.82, pp.269-276, 2008.
- 13 GOMES, A.V. Comportamento Balístico da Alumina com Adição de Nióbia e Variação da Geometria do Alvo. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2004.
- 14 TRINDADE, W.; GOMES. A. V.; LOURO, L.H.L. Elaboração de uma Nova Rota de Eliminação de Ligante da Cerâmica de Alumina. *Revista Militar de Ciência & Tecnologia* 2013; 4: 71-79.
- 15 NIJ Standard 0101.04. Ballistic Resistance of Personal Body Armor. U.S. Department of Justice/Office of Justice Programs. National Institute of Justice, 2000.
- 16 LOURO, L.H.L.; GOMES, A. V.; COSTA, C. R. C. Dynamic fragmentation of alumina with additions of niobia and silica under impact. 19th International symposium of ballistics. Interlaken, Switzerland: s.n., 2001
- 17 MEDVEDOVSKI, E. Lightweight ceramic composite armour system. *Advances in Applied Ceramics* 2006; 105(5): 241-245.
- 18 MEDVEDOVSKI, E. Ballistic Performance of Armour Ceramics: Influence of Design and Structure. Part 1. *Ceramics International* 2010; 36: 2103-2115.
- 19 LUZ, F.S; LIMA Jr, E.P.; LOURO, L.H.L.; MONTEIRO, S.N. Ballistic teste f multilayered armor with intermediate epoxy composite reinforced with jute fabric. *Materials Research* 2015; 18(2): 170-177.

- 20 CHAGAS, C.F.M. Minimização do Efeito de Aresta em Blindagem Cerâmica à Base de Alumina. Tese de Doutorado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.