

Fabricação de Placas de Proteção Balística a base de B₄C-TiC

Cláudio Leão, Anna K. C. Freitas, Fernando A. Andrade
Centro Industrial Nuclear de Aramar, Iperó - SP

Resumo – O carbeto de boro é um dos materiais mais duros existentes e tem sido usado em aplicações onde se requer alta dureza como abrasivos, ferramenta de corte e componentes resistentes à abrasão e, aliado a sua baixa densidade, se torna uma ótima opção para blindagem balística. Devido à natureza das ligações covalentes, a densificação na sinterização é difícil, exigindo o uso de aditivos ou aplicação de pressão com temperatura. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de componentes cerâmicos de carbeto de boro (B₄C) aditivado com carbeto de titânio (TiC). Após a fabricação das placas cerâmicas de B₄C-TiC, as mesmas foram montadas sobre uma placa de aramida para realização de ensaios balísticos, visando a proteção de meios navais, aeronáuticos e aeronavais.

Palavras-chave – Carbeto de boro, carbeto de titânio, blindagem balística.

I. INTRODUÇÃO

A blindagem cerâmica é constituída por um revestimento resistente e rígido capaz de resistir aos impactos provenientes de um evento balístico. Esses painéis cerâmicos devem possuir elevada dureza e resistência à compressão de forma a dissipar a energia dos projéteis através de embotamento e esmagamento [1],[2]. O carbeto de boro (B₄C) é um dos materiais mais duros de uso industrial – em geral apenas inferior ao diamante e nitreto de boro neste quesito - e tem sido usado em placas de blindagem balística, material abrasivo na forma de pó para lapidação e jateamento, ferramenta de corte e componentes resistentes à abrasão. [3]

O carbeto de boro apresenta dentre algumas propriedades físicas e estruturais uma estrutura romboédrica, significativa estabilidade térmica, alto ponto de fusão (2450 °C), baixa densidade (2,52 g/cm³), alta dureza (25-31 GPa - HK200), módulo de elasticidade na ordem de 450 GPa, resistência a flexão entre 150 e 350 MPa e tenacidade a fratura em torno de 1,3 MPa.m^{1/2}. Porém, apresenta como desvantagens o elevado custo de fabricação, oxidação ao ar a baixas temperaturas e dificuldades na sinterização para atingir densidades acima de 90% da densidade teórica, necessitando-se temperaturas acima de 2100°C. [3],[7]

Tradicionalmente, o carbeto de boro tem sido sinterizado usando (i) sinterização sem pressão, com ou sem aditivos (ii) prensagem a quente com ou sem aditivos e (iii) prensagem isostática a quente (HIP). Recentemente, sua sinterização tem sido estudada em outras técnicas como *Spark Plasma Sintering* e *Flash Sintering* [8-11]. Grande variedade de aditivos têm sido propostos como auxiliares de sinterização para o carbeto de boro, geralmente metais (Al, Si, Ti, Fe, Co, Ni, Mg, Cu) e cerâmicas (WC, BN, SiC, TiC, C, B, TiB₂). As

principais finalidades dos auxiliares de sinterização são: diminuir a temperatura de densificação pelo aumento da difusão por volume e contorno de grãos; aumentar a resistência à oxidação e ao choque térmico; retardar o crescimento de grãos; e, eventualmente, permitir uma compensação estequiométrica. A adição de algumas fases, como (W, Ti)C, TiB₂ ou SiC à matriz de B₄C, também pode melhorar propriedades como a tenacidade à fratura e a resistência à flexão. [3-7]

Diversas são as normas para avaliar o comportamento balístico dos materiais e projéteis. O desempenho da proteção balística para proteção militar é geralmente baseado e avaliado segundo padrões internacionais.

O objetivo deste trabalho é a produção de placas cerâmicas a base de B₄C-TiC para avaliação da capacidade balística destas em reter um projétil calibre .50”.

II. METODOLOGIA

Os insumos para a produção da placa balística foram o pó de carbeto de boro (B₄C) com tamanho médio de partícula de $4,09 \pm 0,06 \mu\text{m}$ e área superficial de $2,91 \text{ m}^2/\text{g}$, e o pó de carbeto de titânio (TiC) com tamanho médio de partícula de $(3,57 \pm 0,16) \mu\text{m}$ e área superficial de $4,13 \text{ m}^2/\text{g}$.

O preparo da massa com os 95% de B₄C e 5% TiC foi realizado através da mistura e homogeneização dos pós em um moinho de bolas, utilizando como ligante o álcool polivinílico (PVA) em solução aquosa a 10%, dispersante poliacrilato de amônia, antiespumante e água desmineralizada, formando uma suspensão aquosa. Na etapa seguinte, foi realizada a atomização em *Spray Drying* a uma temperatura de secagem de 330°C. O pó atomizado foi submetido a um peneirador de bancada equipado com as peneiras 70, 80, 140 e 325 mesh e por último foi homogeneizado por 15 minutos em um agitador rotacional em formato Y.

A conformação dos corpos de prova foi realizada por intermédio da prensagem uniaxial de ação simples e matriz flutuante sob pressões de aproximadamente 20 MPa, seguida de compactação a 290 MPa em uma prensa isostática. O resultado obtido no fim da prensagem uniaxial foram placas com dimensões de 60,21 x 60,20 x 27,78 mm, com densidade média $(38,54 \pm 0,03) \%$ da densidade teórica de $2,58 \text{ g/cm}^3$ e após a prensagem isostática, foram produzidas placas de $(51,39 \times 51,41 \times 24,30) \text{ mm}$ que atingiram a densidade média de $(60,56 \pm 0,52) \%$ da densidade teórica.

A sinterização ocorreu em atmosfera controlada de hélio em um forno resistivo em temperaturas entre 2230°C a 2245°C e tempo de patamar de 60 minutos, obtendo-se

densidade média em torno de 85 % da densidade teórica. Por fim, realizou-se a retificação dos briquetes com uma redução média nas dimensões das faces de 0,74 a 0,88 mm objetivando a montagem dos conjuntos de testes balísticos.

Os materiais foram caracterizados por intermédio da dureza em escala Vickers, tenacidade à fratura calculada pelo método da trinca, difração de raio-X e microscopia eletrônica de varredura. Essas caracterizações tem por finalidade avaliar as propriedades mecânicas, a distribuição de fases e microestrutura.

A montagem da placa balística compreende duas camadas, sendo a primeira dela composta pelos briquetes arranjados de modo a compor uma única placa, enquanto a segunda camada foi composta por uma placa inteiriça de aramida, sendo a aderência realizada com uma cola especial, como apresentada na Fig. 1.

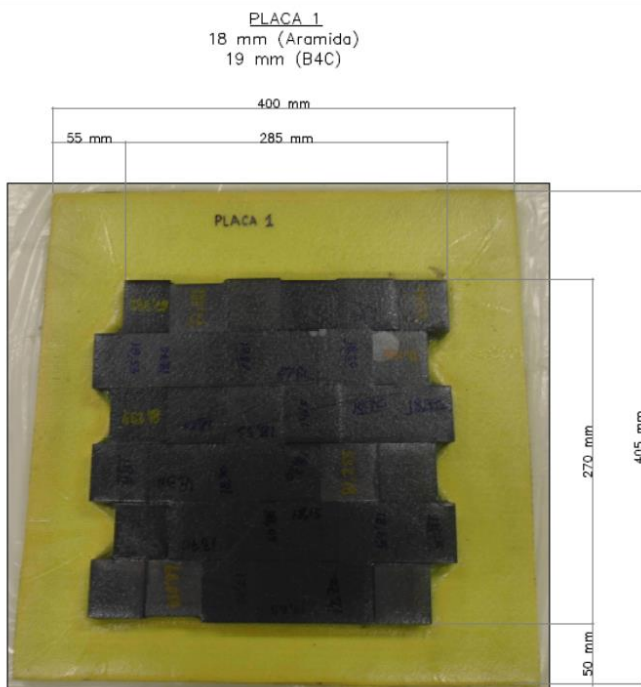


Figura 1: Placa balística após montagem.

Os ensaios de resistência balística foram realizados em um túnel destinado a este fim, segundo a norma UL 752 *Ballistic Standards Level 10* da organização certificadora americana *Underwriters Laboratories* dentro dos parâmetros apresentados na Tabela I.

TABELA I: PARÂMETROS DE TESTE BALÍSTICO

Calibre	12,70 x 99 mm (.50)
Projétil	Nato Ball 42,5 g
Velocidade (V0)	899 ± 43 m/s
Temperatura	22 °C
Umidade	62 %
Distância do Alvo	100 m
Ângulo de Incidência	0 °

Esse ensaio realizado em um túnel balístico empregou uma metralhadora de calibre .50", um cronógrafo e duas barreiras óticas, objetivando a aferição da velocidade do projétil.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Difração de Raio X

Os resultados obtidos através do método de Difração de Raios X do carbeto de boro puro e após sinterização do carbeto de boro com adição de 5% de TiC estão apresentados nas Fig. 2 e 3. Esses pós se mostraram compatíveis com os difratogramas identificados na literatura de cada material. A Fig.1 apresenta os picos característicos do carbeto de boro, com estrutura romboédrica, enquanto a Fig. 2 apresenta o difratograma do pó de carbeto de boro com adição de 5% de carbeto de titânio após sinterização, podendo-se observar picos característicos da nova fase formada, diboreto de titânio (TiB_2), que apresenta estrutura hexagonal. Pode-se também observar um aumento na intensidade dos picos com a adição do aditivo.

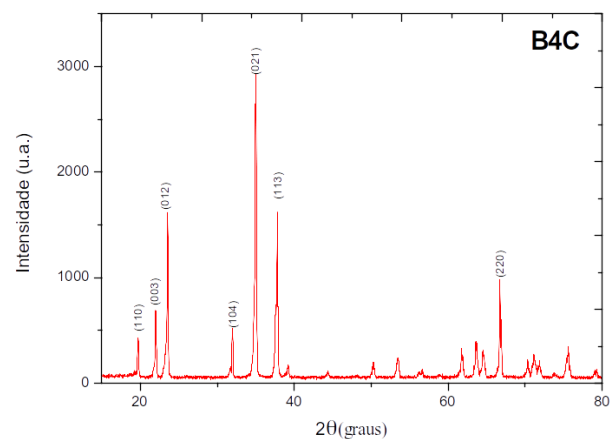


Figura 2: Espectro de difração de raios X do pó de carbeto de boro.

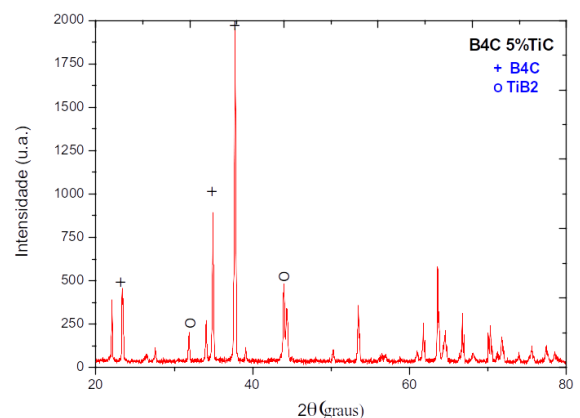


Figura 3: Espectro de difração de raios X do pó sinterizado de B_4C com adição de 5% TiC.

B. Análise Microscópica

A Fig. 4 apresenta a imagem obtida através do microscópio eletrônico de varredura do pó de carbeto de boro, sendo possível observar sua morfologia irregular e sua característica principal, os grãos finos, inerente do pó de B_4C [12].

Na Fig. 5 pode-se observar através das regiões mais claras que houve a formação da fase TiB_2 que é prevista pela reação do TiC com B_4C em temperaturas em torno de $1250^\circ C$ [13].

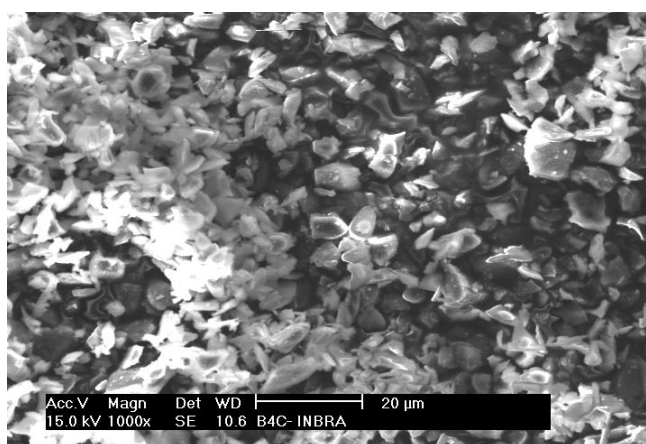


Figura 4: Microscopia Eletrônica de Varredura do pó de B_4C com um aumento de 1000x.

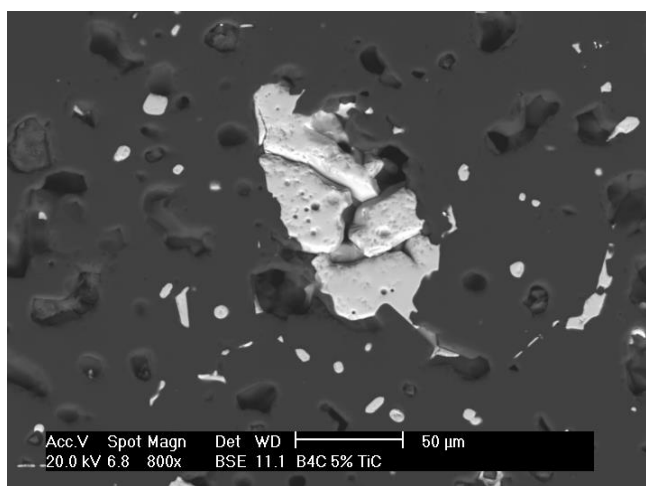


Figura 5: Microscopia Eletrônica de Varredura da placa de B_4C-TiB_2 com um aumento de 800x.

C. Caracterizações Físicas

Após o processo de sinterização foi formada a fase diboreto de titânio (TiB_2). Essas partículas dispersas melhoram tanto a resistência como a tenacidade do B_4C , o que explica o aumento da tenacidade à fratura quando

adicionado 5% de TiC , em comparação com o B_4C puro, como apresentada na Tabela II. Ao formar a fase TiB_2 há formação de microfissuras que são causadas devido à incompatibilidade de expansão térmica entre as partículas dispersas e a matriz, o que conduz ao aumento da tenacidade à fratura [14].

TABELA II: RESULTADO DAS CARACTERIZAÇÕES FÍSICAS DO B_4C E DO B_4C COM A ADIÇÃO DE 5% DE TiC .

	B_4C puro	$B_4C + 5\%TiC$
Tenacidade à Fratura ($MPa.m^{1/2}$)	2,13	3,03
Dureza Vickers (GPa)	30	31

D. Testes Balísticos

Os resultados dos testes nos dois conjuntos de blindagem balística, cujas fotos são apresentadas nas Fig. 5 a 8, ratificaram a boa performance prevista a partir de ensaios mecânicos realizados, não sendo observada perfuração total ou parcial da aramida na placa de blindagem balística, o que garantiria a integridade de um meio aeronaval protegido por estes conjuntos de blindagem.



Figura 5 – Placa 1 após o ensaio balístico – vista frontal.



Figura 6 – Placa 1 após o ensaio balístico – vista traseira.

IV. CONCLUSÕES

As caracterizações realizadas nos materiais confirmaram a formação do diboreto de titânio, obtido a partir da reação do B_4C com TiC . Também foi possível observar aumento na dureza e na tenacidade à fratura. Portanto, há indícios que a fase formada contribuiu efetivamente para a melhoria das propriedades do material produzido, permitindo assim utilizá-lo para a produção das placas balísticas.

Após os testes de resistência aos disparos por uma metralhadora de calibre .50”, verificou-se que não houve perfuração em qualquer uma das placas balísticas confeccionadas com os briquetes cerâmicos e aramida e os resultados experimentais permitiram a proposição de parâmetros do processo de obtenção de materiais cerâmicos de elevada resistência a base de B_4C - TiC .

REFERÊNCIAS

- [1] M. V. da Silva, D. Stainer, H. A. Al-Qureshi, D. Hotza, “Blindagens cerâmicas para aplicações balísticas: uma revisão”, *Cerâmica*, v. 60, p. 323-331, 2014.
- [2] Y. Zhang, H. Dong, K. Liang, Y. Huang, "Impact simulation and ballistic analysis of B4C composite armour based on target plate tests", *Ceramics International*, v. 47, n. 7-A, p. 10035-10049, 2021.
- [3] M.L.R. Coelho, “Estudo da influência do teor de TiB_2 , obtido pela reação in situ de B_4C e TiC , nas propriedades mecânicas de cerâmicas a base de B_4C ”. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2012.
- [4] C-H Junga, M-J Leeb, C-J Kim, “Preparation of carbon-free B_4C powder from B_2O_3 oxide by carbothermal reduction process”, *Mater. Lett.*, v. 58, p. 609–614, 2004.
- [5] F.C.L. Melo, “Efeitos de aditivos na sinterização do carbeto de boro”. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1994.
- [6] A.M. Turatti, “Sinterização de carbeto de boro com alta resistência ao desgaste”. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- [7] F. Thevenot, “Boron Carbide - A Comprehensive Review”, *J. Eur. Ceram. Soc.*, v.6, p. 205-225. 1990.
- [8] F.C. Sahin, B. Apak, I. Akin, H.E. Kanbur, D.H Genckan, *et al*, “Spark plasma sintering of B_4C -SiC composites”, *Solid State Sci.*, v. 14, p. 1660-1663, 2012.
- [9] B.M. Moshaghoun, F.L Cumbre-Hernández, D. Gómez-García, S. Bernardi-Martín, A. Domínguez-Rodríguez, *et al*, “Effect of spark plasma sintering parameters on microstructure and room-temperature hardness and toughness of fine-grained boron carbide (B_4C)”, *J. Eur. Ceram. Soc.*, v. 33, p. 361–369, 2013.
- [10] K.H. Kima, J.H Chaea, J.S. Parka, J.P. Ahna, K.B Shim, “Sintering behavior and mechanical properties of B_4C ceramics fabricated by spark plasma sintering”, *J. Ceram. Process. Res.*, v. 10, n. 6, p. 716-720, 2009.
- [11] M. Asadikiya, C. Zhang, C. Rudolf, B. Boesl, A. Agarwal, *et al*, “The effect of sintering parameters on spark plasma sintering of B_4C ”. *Ceram. Int.*, v. 43, n. 14, p. 11182-11188, 2017.
- [12] M. S. Heydari, H. R. Baharvandi, K. Dolatkah, "Effect of TiO_2 nanoparticles on the pressureless sintering of B_4C - TiB_2 nanocomposites", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, v. 51, p. 6-13, 2015.
- [13] L.S. Sigl, “Processing and Mechanical Properties of Boron Carbide Sintered with TiC ”, *Journal of the European Ceramic Society*, v. 18, p.1521-1529, 1998.
- [14] M. Rafiei, M. Salehi, M. Shamanian, "Formation mechanism of B_4C - TiB_2 - TiC ceramic composite produced by mechanical alloying of Ti - B_4C powders", *Advanced Powder Technology*, v. 25, n. 6, p. 1754-1760, 2014.

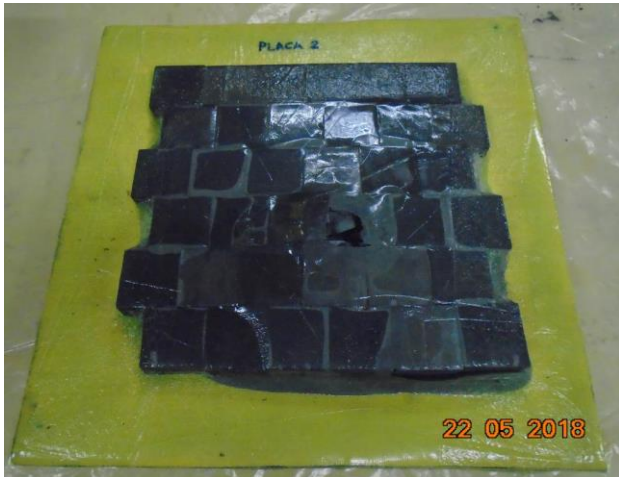


Figura 7 – Placa 2 após o ensaio balístico – vista frontal.



Figura 8 – Placa 2 após o ensaio balístico – vista traseira.

Na Tabela III são apresentados os parâmetros obtidos através do ensaio balístico, como a velocidade do projétil e a energia durante o teste.

TABELA III: DADOS OBTIDOS NOS TESTES BALÍSTICOS.

	Velocidade do projétil (m/s)	Energia (J)	Penetração
Placa 1	V0m = 897	17.098	Não
	V100m = 868	16.010	
Placa 2	V0m = 891	16.870	Não
	V100m = 862	15.789	