

# BLINDAGEM COM $B_4C$ : DOMÍNIO TECNOLÓGICO EM ALTA DENSIFICAÇÃO E PROTEÇÃO BALÍSTICA CONTRA CALIBRE .50

Armor with  $B_4C$ : Technological Mastery in High Densification and Ballistic Protection Against .50 Caliber

Fernando Augusto de Andrade<sup>1</sup>, Cláudio Leão<sup>2</sup>, Renato Bertin Casagrande<sup>3</sup>

**Resumo:** O presente trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação de placas balísticas cerâmicas densas de terceira geração à base de carbeto de boro ( $B_4C$ ), com adição de carbeto de titânio (TiC) como agente sinterizante. O objetivo foi alcançar a máxima densificação e aprimorar as propriedades mecânicas das placas para aplicação em proteção contra projéteis de alto calibre, como munições .50. Foram empregadas técnicas tradicionais de atomização, prensagem e sinterização associadas à prensagem isostática a quente (HIP), resultando em placas com densidade final próxima ao limite máximo de densidade teórica. A incorporação do TiC levou à formação *in situ* de  $TiB_2$ , o que contribuiu para o aumento da dureza e da tenacidade à fratura, além de favorecer a densificação e estabilidade microestrutural. Os testes balísticos demonstraram que as placas desenvolvidas são eficazes contra impactos de projéteis de alto calibre, validando o potencial do sistema  $B_4C$ - $TiB_2$  como solução avançada para blindagens leves de alto desempenho.

**Palavras-chave:** Blindagem Balística. Carbeto de Boro ( $B_4C$ ). Densificação.

**Abstract:** This paper presents the development and evaluation of third-generation dense ceramic ballistic plates based on boron carbide ( $B_4C$ ), with the addition of titanium carbide (TiC) as a sintering aid. The aim was to achieve maximum densification and enhance the mechanical properties of the plates for application in protection against high-caliber projectiles, such as .50 caliber ammunition. Traditional techniques of atomization, pressing, and sintering were employed, combined with hot isostatic pressing (HIP), resulting in plates with final density close to the theoretical maximum. The incorporation of TiC led to the *in situ* formation of  $TiB_2$ , which contributes to increased hardness and fracture toughness, as well as promoting densification and microstructural stability. Ballistic tests demonstrated that the developed plates are effective against high-caliber projectile impacts, validating the potential of the  $B_4C$ - $TiB_2$  system as an advanced solution for lightweight, high-performance armor.

**Keywords:** Ballistic Armor. Boron Carbide ( $B_4C$ ). Densification.

**1.** Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Santa Catarina. Encarregado da Divisão de Combustíveis Nucleares e Componentes Cerâmicos do Centro Industrial Nuclear de Aramar, Iperó, SP - Brasil. E-mail: fernando.andrade@marinha.mil.br

**2.** Mestre em Tecnologia Nuclear pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Encarregado da Seção de Fabricação de Cerâmicas Nucleares Especiais do Centro Industrial Nuclear de Aramar, Iperó, SP - Brasil. E-mail: claudio.leao@marinha.mil.br

**3.** Técnico em mecânica da Seção de Fabricação de Cerâmicas Nucleares Especiais do Centro Industrial Nuclear de Aramar, Iperó, SP - Brasil. E-mail: renato.casagrande@marinha.mil.br

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história, os períodos de guerra têm sido propulsores da evolução tecnológica da humanidade, e um dos avanços proporcionados pela ciência da guerra está no poder armamentista e seu potencial de destruição (BUENO, 2022). Isso fez crescer a demanda por sistemas capazes de oferecer proteção eficaz contra impactos de projéteis de alta energia, impulsionando o desenvolvimento e a aplicação de cerâmicas avançadas em blindagens balísticas.

A característica fundamental desejada para um sistema de proteção, seja para a proteção individual, seja para veículos, deve ser sua elevada resistência contra armamentos destrutivos aliada ao baixo peso da blindagem. Assim, para a proteção balística, são requisitos desejáveis a elevada dureza, alta resistência à fratura e à compressão e, sobretudo, baixa densidade (DRESCH, 2021).

Entre os materiais cerâmicos mais utilizados para esse fim, destacam-se o carbetos de boro ( $B_4C$ ), o carbetos de silício ( $SiC$ ) e a alumina ( $Al_2O_3$ ) (SILVEIRA et al., 2021). Nesse contexto, o  $B_4C$  destaca-se como o material mais promissor, apresentando um dos melhores balanços entre os requisitos mencionados, assegurando proteção ao permitir a dissipação de energia cinética do projétil com maior eficiência e auxiliando na mobilidade em razão da menor adição de massa ao sistema de proteção (ZHANG et al., 2021). Essas características tornam o  $B_4C$  altamente competitivo perante o  $SiC$  e a  $Al_2O_3$ , que apresentam desempenho inferior em termos de proteção por unidade de peso — uma característica notadamente vantajosa em aplicações onde a redução de peso é um aspecto importante, como coletes balísticos e blindagens veiculares de alto desempenho (KULIIEV, 2020).

Dessa forma, o grau de densificação é um fator crítico para o desempenho de cerâmicas balísticas, e é representado por uma porcentagem da densidade teórica, tendo para o  $B_4C$  o valor máximo de  $2,52 \text{ g/cm}^3$  (REDDY; SAVIO; MADHU, 2019). No entanto, a densificação plena do  $B_4C$  é um grande desafio tecnológico em virtude de ser um material covalente com elevada dureza e alto ponto de fusão (SONBER, 2013). A presença de porosidade compromete severamente a capacidade de dissipação de energia do impacto e a eficiência da proteção (MEDVEDOVSKI, 2010). Aditivos em grande variedade têm sido propostos

como auxiliares de sinterização, entre metais ( $Al$ ,  $Ti$ ,  $Fe$ ,  $Co$ ,  $Ni$ ,  $Mg$  e  $Cu$ ) e cerâmicos ( $WC$ ,  $BN$ ,  $SiC$ ,  $TiC$  e  $TiB_2$ ), cujas principais funções são propiciar a diminuição da temperatura de sinterização pelo aumento da difusão por volume e contorno de grãos e também melhorar as propriedades mecânicas como tenacidade à fratura e resistência à flexão (LEÃO; FREITAS; ANDRADE, 2022).

Para que as cerâmicas avançadas sejam fabricadas, tipicamente são submetidas à prensagem para compactação da matéria-prima em pó e posteriormente são sinterizadas (RIBEIRO; TULYAGANOV, 2021). O processo de prensagem uniaxial, mais simples, refere-se à aplicação de pressão em uma única direção, que pode resultar em menor uniformidade na densidade ao longo da peça e presença mais elevada de poros. Para solucionar isso, na prensagem isostática se aplica pressão uniforme em todas as direções por meio de um fluido, resultando, assim, em uma compactação mais homogênea e de mais elevada densidade. Após a prensagem, a sinterização é uma etapa de tratamento térmico em que ocorre a exposição da peça a altas temperaturas visando à união e ao coalescimento do pó, com redução da porosidade interna. Como resultado, obtêm-se peças sólidas de maior densidade e com maior desempenho mecânico quando comparadas às peças apenas prensadas. Entretanto, a sinterização em forno convencional, por si só, é insuficiente para alcançar a densificação próxima à teórica, em consequência de fortes ligações atômicas, baixa mobilidade e difusão atômica do pó. Para alcançar valores de densificação mais elevados, emprega-se a prensa isostática a quente (*hot isostatic pressing*, HIP), na qual uma placa pré-sinterizada é inserida dentro de câmara fechada e submetida simultaneamente a elevadas pressão e temperatura, promovendo o fechamento da porosidade interna residual. Assim, a obtenção de máxima densificação por meio da aplicação de pressão e temperatura elevadas é essencial para garantir a integridade e a eficácia dos componentes cerâmicos sob impacto balístico.

Em recentes avanços alcançados no Centro Industrial Nuclear de Aramar, foi possível desenvolver a etapa de produção do pó de  $B_4C$ , que contribui para a nacionalização e soberania tecnológica deste importante material, que tem também aplicações nucleares. Além disso, foi desenvolvida uma série de projetos para a confecção de placas balísticas à base de  $B_4C$  (BRASIL, 2002, COELHO, 2012; LEÃO;

FREITAS; ANDRADE, 2022). Os primeiros passos ocorreram com o desenvolvimento de placas de primeira geração, utilizando  $B_4C$  como matéria-prima base, e diversos testes para identificar os melhores aditivos e parâmetros de processamento. Em seguida, selecionado o aditivo TiC, foram fabricados protótipos de segunda geração com o emprego de sinterização convencional e depois disso, na terceira geração, com a aplicação de prensagem isostática a quente, visando ao aumento de densificação no produto final, representando ganhos em propriedades e evolução dos sistemas cerâmicos de proteção balística.

## 2. OBJETIVOS

Desenvolver componentes de blindagem balística com placas cerâmicas de alta densificação à base de  $B_4C$ , determinando as suas propriedades mecânicas e microestruturais, e avaliando a sua capacidade de resistir à penetração por meio dos ensaios balísticos para o maior nível de classe normatizado que é a munição de calibre .50.

## 3. METODOLOGIA

A fabricação de placas cerâmicas para proteção balística foi realizada conforme sequência típica de processamento, que envolve: condicionamento das matérias-primas, atomização, homogeneização, prensagem uniaxial, prensagem isostática a frio, sinterização em forno convencional, densificação na HIP e retificação, tais como ilustrados na Figura 1.

A primeira etapa envolve a formação de uma suspensão aquosa empregando o moinho de bolas por meio da mistura dos pós, 95 % da matéria-prima  $B_4C$  e 5 % do aditivo TiC, em água desmineralizada, dispersante poliacrilato de amônio, antiespumante à base de óleo mineral e o ligante álcool polivinílico (PVA) a 10 % em água.

Para melhorar a propriedade de fluidez dos pós, necessária à etapa posterior de prensagem, foi realizada a atomização em *Spray Dryer* com temperatura de secagem de 190°C. Essa etapa produz, com o uso de suspensões líquidas, pós secos com partículas esféricas por meio do uso de jato fino em contrafluxo de ar quente. O pó atomizado passa por um peneirador de bancada para controle granulométrico e, em

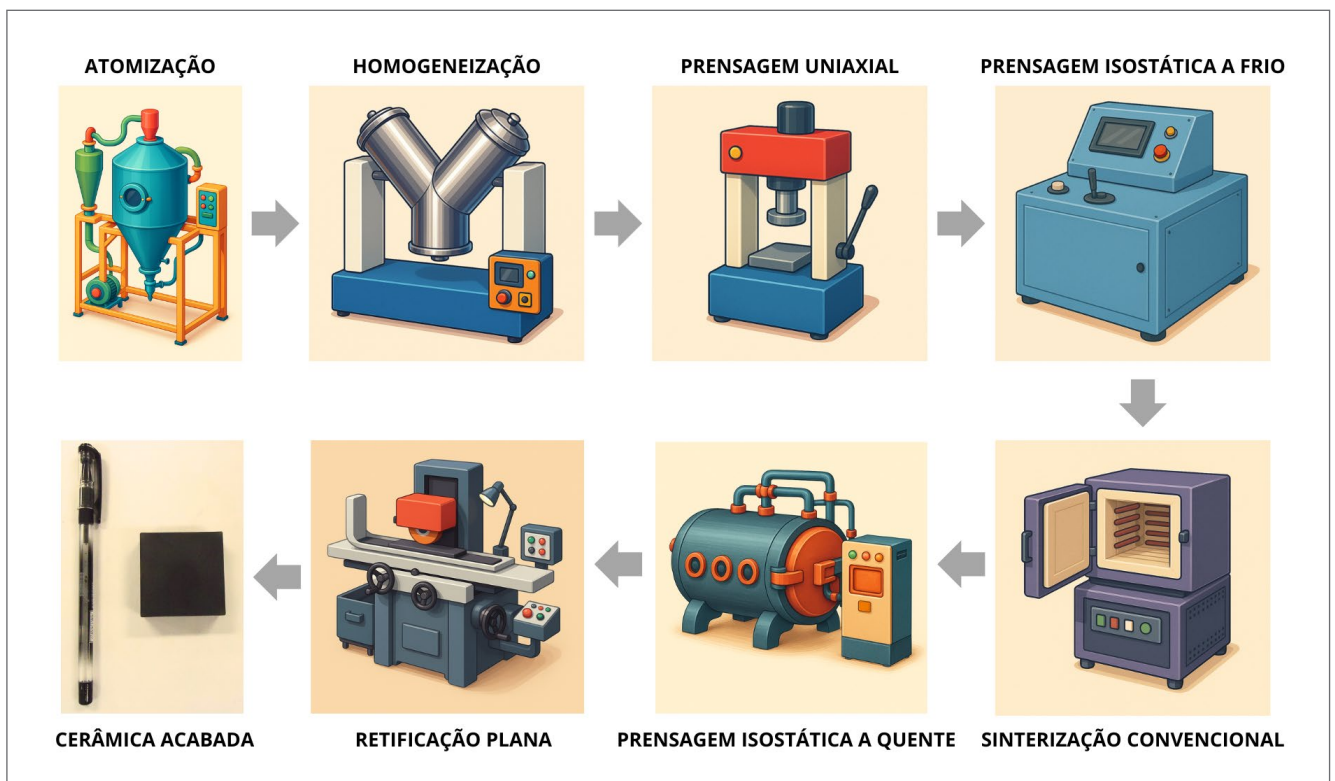


Figura 1. Fluxograma de fabricação de placas cerâmicas.

seqüência, pelo agitador rotacional em formato Y para a homogeneização de bateladas.

A conformação inicial das placas foi realizada por prensagem uniaxial de ação simples e matriz flutuante sob força de 2,5 tf, seguida de prensagem isostática a frio a 290 MPa por 5s, visando aumentar a sua densidade e reduzir a porosidade interna.

As placas foram sinterizadas em forno resistivo com atmosfera controlada de gás hélio, utilizando temperaturas entre 2.230 e 2.245 °C e tempo de patamar de 60 minutos. A elevada temperatura, estando abaixo do ponto de fusão do  $B_4C$  (2.350 °C), fornece energia suficiente para a difusão atômica e a união de partículas, aumentando a densificação das placas cerâmicas, enquanto a atmosfera inerte evita reações indesejáveis como a formação de óxido de boro por meio da oxidação do  $B_4C$ .

Como última etapa de densificação, a HIP foi utilizada em temperatura média de 1.970 °C e pressão de 200 MPa, por 60 minutos. A retificação é empregada então para a redução dos defeitos superficiais, os quais facilitam a propagação de trincas, além de promover melhor acabamento de planicidade e uniformidade dimensional.

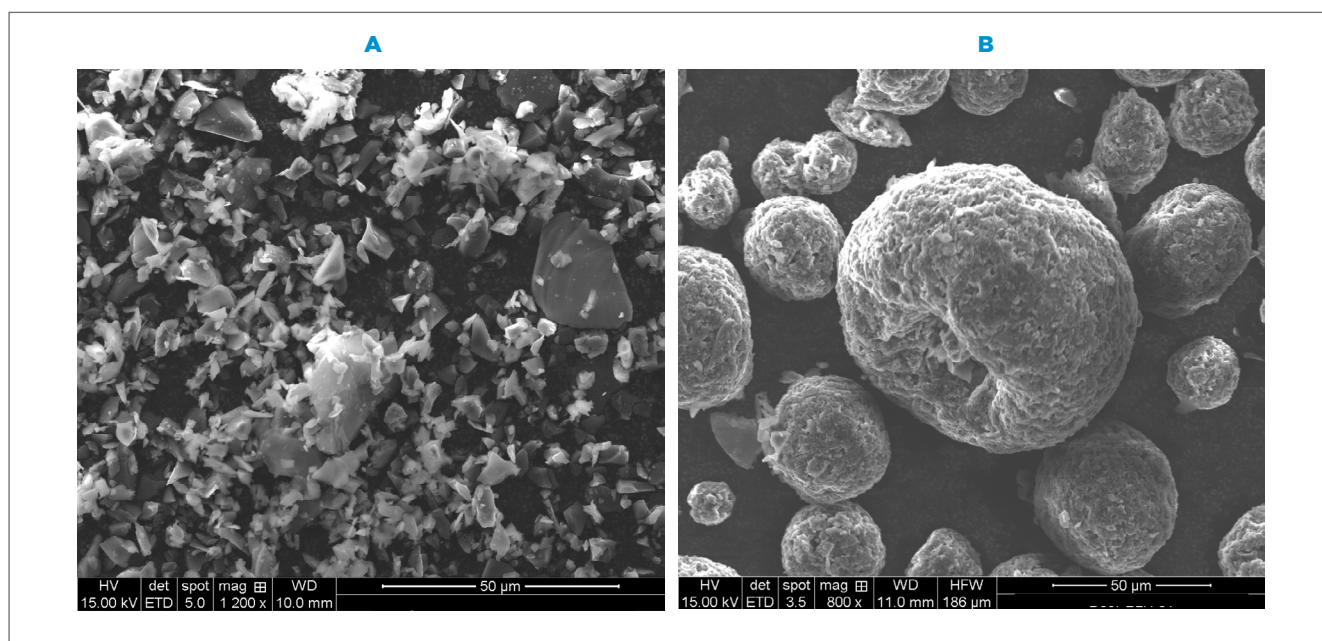
Para a montagem dos conjuntos de blindagem visando aos ensaios de resistência balística, as placas são arranjadas sobre uma placa de aramida, que serve tanto de suporte para

as cerâmicas quanto para prover ao conjunto a contenção de estilhaços durante o impacto do projétil.

Normas brasileiras como a NBR 15000 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) não contemplam a proteção contra projéteis de calibre .50, e portanto as placas foram submetidas ao ensaio de acordo com a norma *UL 752 Ballistic Standards Level 10* da organização certificadora americana *Underwriters Laboratories*. De acordo com este protocolo, emprega-se uma metralhadora calibre .50 em um túnel com cronógrafo e duas barreiras óticas, que possibilitam aferir a velocidade do projétil e determinar a energia do impacto.

## 4. RESULTADOS

A atomização realizada nas suspensões cerâmicas resultaram em pós de maior fluidez por conta do formato esférico de suas partículas, que permitem melhor escoamento na matriz da prensa se comparados ao pó como recebido (Figura 2A), o qual não escoava. Esse resultado é evidenciado tanto pelo resultado do teste de escoabilidade após homogeneização, de  $0,245 \pm 0,001$  g/s, quanto em imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV), na qual se observa a estrutura esférica formada no processo de atomização (Figura 2B).



**Figura 2.** Microscopia de pós de  $B_4C$ . (A) Pó como recebido, com estrutura irregular. (B) Atomizado, com estrutura esférica de elevada escoabilidade.

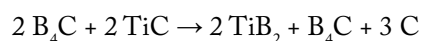
Essa distribuição esférica auxilia na densificação e diminui gradientes de densidade ao longo da peça prensada.

A compactação dos pós de  $B_4C$  e  $TiC$  homogeneizados utilizando a prensagem uniaxial resultou em densidade de  $38,54 \pm 0,03$  % da densidade máxima teórica. Após a densificação na prensa isostática, o valor da densidade média alcançou valores de  $60,56 \pm 0,52$  %. A seguir, a sinterização em forno resistivo de atmosfera controlada de hélio resultou em aumento de densidade para  $91,04 \pm 0,49$  %. Observa-se que tal processo convencional foi incapaz de densificar totalmente, em função da alta dificuldade de sinterização da matéria-prima, mesmo com as elevadas temperaturas utilizadas. Por fim, a densificação com a HIP resultou em densidade de  $99,74 \pm 0,11$  %, demonstrando o elevado desempenho que a técnica é capaz de oferecer. Para atingir essa densidade por meio da sinterização convencional, que não utiliza da aplicação simultânea de pressão e temperatura, seriam necessárias temperaturas superiores a  $2.250$  °C e próximas ao ponto de fusão do material (ZHANG; YAMASHITA; KITA, 2019). Em temperaturas tão elevadas, o crescimento de grão ocorre de forma rápida e anormal, afetando as propriedades mecânicas e, conseqüentemente, influenciando negativamente o desempenho da cerâmica (ZHAO, 2024).

A dureza média do briquete sinterizado em forno convencional foi de  $1.850$  Kg $f/mm^2$ . Após a utilização da HIP, a dureza aumentou em aproximadamente 20%, alcançando valores médios de  $2.233$  Kg $f/mm^2$ . Esse efeito é de grande importância para a aplicação balística, visto que a dureza elevada do cerâmico é responsável pela fragmentação do projétil no primeiro impacto, reduzindo a energia cinética e o poder de penetração. Enquanto blindagens metálicas absorvem energia do projétil por deformação plástica, no caso das cerâmicas, a energia cinética do projétil é dissipada por meio da sua fratura (MEDVEDOVSKI, 2010). Assim, observou-se também um significativo aumento na tenacidade à fratura quando se compara a amostra sinterizada em forno convencional com a prensada isostaticamente a quente. A primeira resultou em  $4,22 \pm 1,45$  MPa.m<sup>1/2</sup>, enquanto as amostras submetidas à HIP, com menor porosidade interna e maior densidade, obtiveram tenacidade à fratura de  $4,95 \pm 1,38$  MPa.m<sup>1/2</sup>, um aumento de aproximadamente 17%. Como consequência, esta última é capaz de absorver mais energia antes de sua fratura, melhorando o desempenho balístico.

Em termos de análise de fases presentes por difração de raios X, ambas as amostras, com e sem HIP, obtiveram

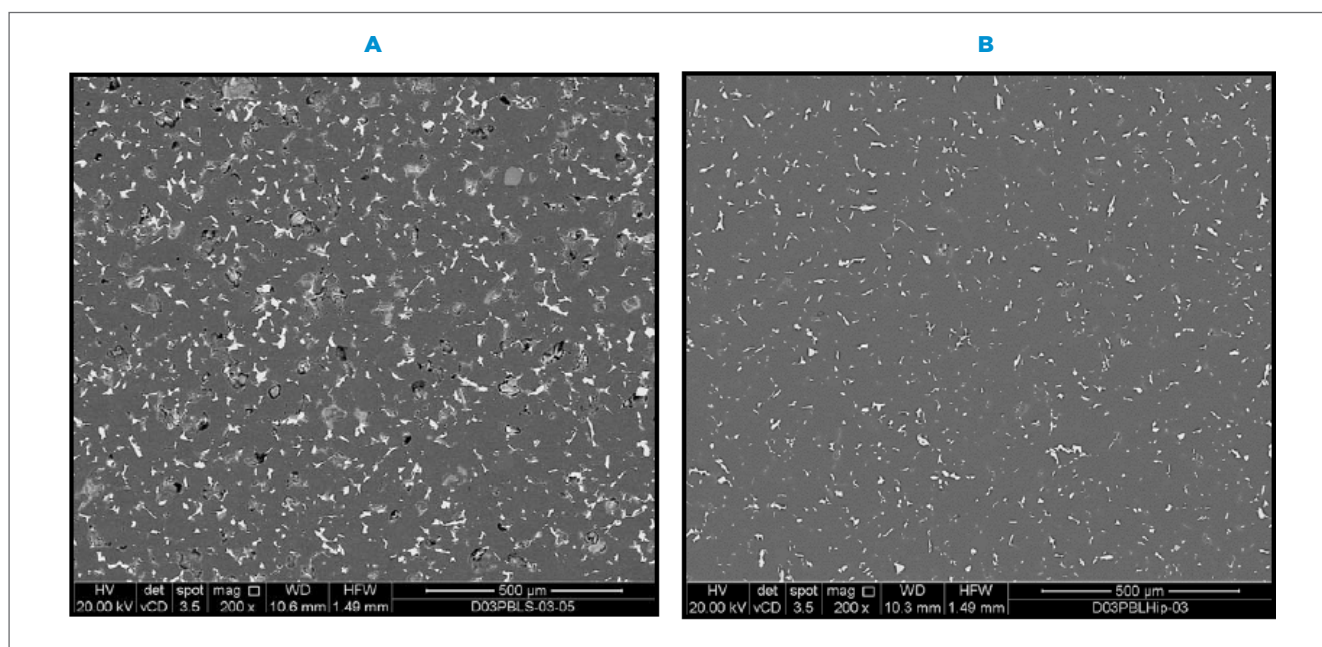
quantitativos semelhantes: 96,1% de  $B_4C$ , 3,3% de  $TiB_2$  e 0,6% de C. Isso se deve ao fato de que todas as reações nas placas ocorrem já na primeira sinterização em forno convencional, a que ambos os casos são submetidos. Dessa forma, a HIP atua apenas na compactação final, com aumento da densidade final e sem reações químicas adicionais entre os componentes. Nota-se também que a difração de raios X identifica a presença do diboreto de titânio  $TiB_2$ , que decorre da incorporação do aditivo  $TiC$  reagindo *in situ* com o  $B_4C$  para formação de  $TiB_2$ , conforme a reação:



O aditivo  $TiB_2$  colabora com uma série de propriedades importantes para as aplicações balísticas. Entre elas, causa inibição do crescimento de grãos de  $B_4C$ , localizando-se nos contornos de grão e impedindo seu crescimento durante a sinterização, elevando assim as propriedades mecânicas do material (LIU et al., 2020). Ocorre também aumento da dureza e tenacidade à fratura, em que tensões residuais geradas pelas diferenças nos coeficientes de expansão térmica promovem deflexão da trinca e aumentam a energia necessária para a fratura. Por fim, contribui com maior densificação após a sinterização, resultando também em maior dureza (NIU, 2021).

Por meio de imagens obtidas por MEV, foi possível observar a eliminação da porosidade após o processo HIP e a distribuição homogênea do aditivo  $TiB_2$  na matriz de  $B_4C$ , o qual foi identificado por meio das regiões de maior contraste (Figura 3). A determinação dos tamanhos médios de grãos foi realizada após o processo HIP por microscopia ótica, resultando  $4,6 \pm 3,5$  μm para  $TiB_2$  e  $23,4 \pm 1,2$  μm para  $B_4C$ , que, se comparado ao tamanho de partícula  $3,9 \pm 0,1$  μm determinado na matéria-prima  $B_4C$ , indica um crescimento dimensional de grão esperado para sinterizações em altas temperaturas.

Foram confeccionados dois conjuntos de blindagens compostos de uma camada com 36 placas cerâmicas de  $B_4C$ - $TiB_2$  — dimensões médias 42,2 x 42,2 x 20 mm — fixas por uma camada resistente de 18 mm de aramida obtida por resina e cura a frio. A massa aproximada de cada conjunto foi de 6,1 kg e dimensões aproximadas de 285 x 270 mm. Ambos os conjuntos foram submetidos ao ensaio de resistência balística para materiais protetivos conforme parâmetros apresentados na Tabela 1.



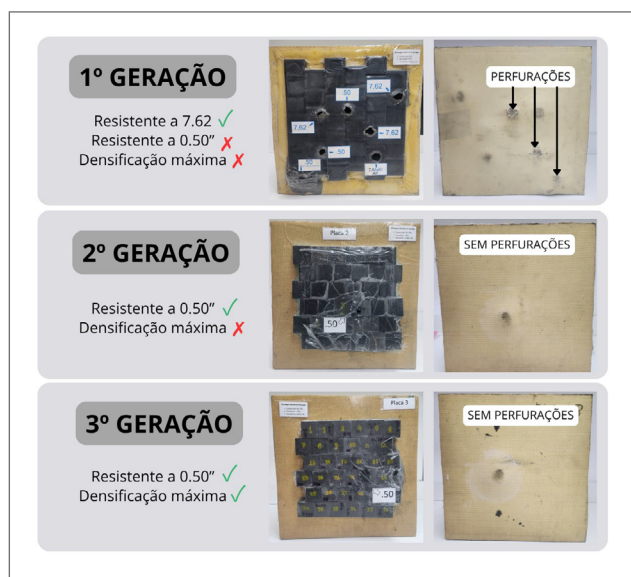
**Figura 3.** Microscopia eletrônica de varredura (MEV) do cerâmico  $B_4C-TiB_2$ . As áreas claras representam  $TiB_2$ . (A) Após a sinterização, apresentando alguma porosidade aparente. (B) Após a prensagem isostática a quente, apresentando ausência de porosidade.

**Tabela 1.** Parâmetros utilizados no ensaio de resistência balística.

Calibre	12,70 x 99 mm (.50)
Projétil	Nato Ball 42,5g
Velocidade inicial	(899 ± 43) m/s
Temperatura do ensaio	21 °C
Umidade	65%
Distância do alvo	100 m
Ângulo de incidência	0°

Considerando o alvo a 100 metros de distância, o projétil alcançou velocidade superior a 860 m/s no impacto, e as placas foram capazes de absorver os disparos sem a perfuração da placa base de aramida, absorvendo em média 15.992 ± 77,78 J de energia. Isso mostra que o cerâmico foi capaz de reduzir a energia cinética do projétil, prevenindo a completa perfuração do sistema e evidenciando a alta capacidade de conter danos.

A comparação dos resultados entre as gerações de placas balísticas é resumida na Figura 4. No que se refere à proteção balística, é importante mencionar que, já na primeira



**Figura 4.** Comparação dos ensaios balísticos das diferentes gerações de placas balísticas de  $B_4C$ .

geração, foi possível observar a capacidade do conjunto para reter projétil 7,62, porém com transfixação do projétil .50. Enquanto as placas de segunda geração, sem passar pelo processo HIP, alcançaram densidades próximas a 85%, a utilização da HIP na terceira geração resultou em uma densificação

próxima a 100% da densidade teórica, sendo ambas aprovadas nos ensaios balísticos de nível máximo segundo a norma UL 752. Dessa forma, a terceira geração proporciona alto poder de proteção, com a possibilidade de redução de material cerâmico e diminuição de peso, representando avanço na tecnologia de proteção balística.

## 5. CONCLUSÃO

O desenvolvimento das placas balísticas cerâmicas de terceira geração à base de  $B_4C$  com adição de  $TiC$  como agente

sinterizante e utilização do processo HIP demonstrou avanços significativos em relação às gerações anteriores. A combinação das técnicas de prensagem uniaxial, prensagem isostática e HIP permitiu alcançar densificação próxima ao valor teórico máximo, superando os desafios associados à sinterização convencional do carbetto de boro.

Esses resultados salientam o potencial da terceira geração de cerâmicas  $B_4C-TiB_2$  como solução tecnológica na área de defesa para blindagens leves de alto desempenho, com possibilidade real de redução de peso sem comprometer a eficácia da proteção, atendendo assim às exigências cada vez mais rigorosas de aplicações militares e de segurança.

## REFERÊNCIAS

- BRASIL. Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo. Programa de Desenvolvimento de Blindagens Balísticas em Carbetto de Boro ( $B_4C$ ) - 1ª Etapa de Desenvolvimento: Análise de Viabilidade Técnica. *Relatório de Informação Técnica do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo*, 2002. 89 p.
- BUENO, C. Ciência para a guerra e para a paz: uso militar ajudou a ciência a avançar, mas o papel da ciência na busca pela paz é fundamental. *Ciência e Cultura*, v. 74, n. 4, 2022. <http://doi.org/10.5935/2317-6660.20220074>
- COELHO, M. L. R. Estudo da influência do teor de  $TiB_2$ , obtido pela reação in situ de  $B_4C$  e  $TiC$ , nas propriedades mecânicas de cerâmicas à base de  $B_4C$ . 2012. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2012. <https://doi.org/10.11606/D.85.2012.tde-24082012-140442>
- DRESCH, A. B. et al. Ballistic ceramics and analysis of their mechanical properties for armour applications: A review. *Ceramics International*, v. 47, n. 7, Part A, p. 8743-8761, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.095>
- KULIIEV, R. Mechanical properties of boron carbide ( $B_4C$ ). Dissertation (Master of Science in Aerospace Engineering) - University of Central Florida, 2020. <https://purl.library.ucf.edu/go/DPO023265>
- LEÃO, C.; FREITAS, A. K. C.; ANDRADE, F. A. Fabricação de placas de proteção balística à base de  $B_4C-TiC$ . In: SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA (SIGE), 24, 2022. *Anais [...] 2022*.
- LIU, Y. et al. Effect of sintering temperature and  $TiB_2$  content on the grain size of  $B_4C-TiB_2$  composites. *Materials Today Communications*, v. 23, p. 100875, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100875>
- MEDVEDOVSKI, E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1. *Ceramics International*, v. 36, n. 7, p. 2103-2115, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.05.021>
- NIU, H. et al. Effects of  $TiB_2$  particles on the microstructure evolution and mechanical properties of  $B_4C/TiB_2$  ceramic composite. *Materials*, v. 14, n. 18, p. 5227, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14185227>
- REDDY, P. R. S.; SAVIO, S. G.; MADHU, V. Ceramic composite armour for ballistic protection. In: *Handbook of Advanced Ceramics and Composites*. Cham: Springer, p. 357-402, 2019. [http://doi.org/10.1007/978-3-030-16347-1\\_10](http://doi.org/10.1007/978-3-030-16347-1_10)
- RIBEIRO, M. J.; TULYAGANOV, D. Traditional ceramics manufacturing. In: *Ceramics, Glass and Glass-Ceramics*. Cham: Springer, p. 75-118, 2021. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85776-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85776-9_3)
- SILVEIRA, P. H. P. M. et al. A brief review of alumina, silicon carbide and boron carbide ceramic materials for ballistic applications. *Academia Letters*, p. 1-11, 2021. <https://doi.org/10.20935/AL3742>
- SONBER, J. K. et al. Synthesis, densification and characterization of boron carbide. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, v. 72, n. 2, p. 100-107, 2013. <http://doi.org/10.1080/0371750X.2013.817755>
- ZHANG, W.; YAMASHITA, S.; KITA, H. Progress in pressureless sintering of boron carbide ceramics - A review. *Advanced Applied Ceramics*, v. 118, n. 4, p. 222-239, 2019. <http://doi.org/10.1080/17436753.2019.1574285>
- ZHANG, Y. et al. Impact simulation and ballistic analysis of  $B_4C$  composite armour based on target plate tests. *Ceramics International*, v. 47, n. 7A, p. 10035-10049, 2021. <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.150>
- ZHAO, K. et al. Sintering mechanism of pure  $B_4C$  ceramic prepared by hot oscillating pressing and with excellent mechanical properties. *Advanced Engineering Materials*, v. 26, n. 16, 2024. <http://doi.org/10.1002/adem.202400695>