



08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

CARBETO DE BORO (B_4C): REVISÃO ACADÊMICA ACERCA DAS PROPRIEDADES E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

Denise Dantas Muniz¹ – denise.muniz@ct.ufpb.br

Eliandro Pereira Teles² – eliandropt@hotmail.com

Danielle Guedes de Lima Cavalcante³ – danielleguedes02@gmail.com

Eduardo Braga Costa Santos⁴ – eduardo.santos@ct.ufpb.br

¹ Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – João Pessoa, PB, Brazil

² Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Graduação em Engenharia de Materiais – João Pessoa, PB, Brazil

³ Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – João Pessoa, PB, Brazil

⁴ Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – João Pessoa, PB, Brazil

Resumo. Este trabalho tem por objetivo descrever o carbeto de boro (B_4C) quanto às suas características estruturais, propriedades mecânicas, térmicas e de interface superficial. O B_4C é um carbeto no modelo E_xC_y no qual sua composição química possui grande espectro de composições estequiométricas, oriundo da redução do B_2O_3 em fornos de arco elétrico operando entre 1000 e 1500 °C, possuindo estrutura romboédrica, baixa densidade, alto ponto de fusão e propriedades nucleares excelentes. Foi realizada uma revisão na literatura acerca do B_4C , suas características principais e propriedades mecânicas como a dureza e resistência à fratura frágil, propriedades de interface como a área superficial específica e a capacidade de adsorção/dessorção e as propriedades térmicas. Os resultados aferidos indicam uma altíssima dureza, área superficial específica elevada, possuindo uma boa molhabilidade em função do substrato que o envolve e a problemática da dissociação do carbono quando inserido em matrizes metálicas como o cobre, o ouro e a prata, que demandam o uso de agentes de fluxo para garantir uma melhor molhabilidade da superfície do B_4C e melhorar as propriedades dos compósitos de matriz metálica reforçados por B_4C .

Palavras-chave: Carbeto de boro, Caracterização, Revisão Acadêmica, Propriedades.

BORON CARBIDE (B_4C): ACADEMIC REVIEW ABOUT THE PROPERTIES AND MAIN CHARACTERIZATIONS

Abstract. This paper has the goal to describe the boron carbide (B_4C) about its structural characteristics, mechanical, thermal and surface interface properties. The B_4C is a E_xC_y model carbide in which its chemical composition has a great spectre of stechiometric ones, that becomes from the reduction of B_2O_3 in electric arc furnaces operating between 1000 and 1500 °C, having a romboedric structure, low density, high melt point and excellent nuclear properties. A review of the literature was done about the B_4C , its main characteristics and mechanical properties like hardness and fragile fracture resistance, interface properties like the Specific Surface Area and adsorption/desorption capacity and the thermal properties. The obtained results show an ultimate hardness, elevated Specific Surface Area, bringing a good wettability considering the substrate that evolves and the carbon dissociation problem during the insertion in metallic matrices like copper, gold and silver, which demands flux agents to warrant a better B_4C surface wettability and increase the B_4C reinforced metallic matrix composites.

Keywords: Boron carbide, Characterization, Academic Review, Properties.

1. CARBETO DE BORO

Um carbeto de grande importância para atividades de alto valor agregado na indústria é o carbeto de boro, material covalente não-metálico com fórmula estequiométrica teórica B_4C . No entanto, é obtido através da redução do B_2O_3 em fornos de arco elétrico entre 1000 e 1500 °C, o que encarece sua obtenção; e sua composição é, geralmente, rica em boro (PIERSON, 1999; AZoM, 2011).

Possui densidade de $2,52 \text{ g/cm}^3$, podendo ser reduzida para valores entre $2,42 \text{ g/cm}^3$ (pó grosso) e $2,33 \text{ g/cm}^3$ (pó fino), massa molar em $55,25 \text{ g/mol}$, ponto de fusão entre 2350 °C e 2450 °C, conforme figura 1 seguinte, alta resistência ao desgaste e flexão (350-500 MPa), boa inércia química, alto módulo de elasticidade (450-470 GPa), insolubilidade em água e alta seção de choque para absorção de nêutrons (TURATTI, 2009; SANTOS, 1995).

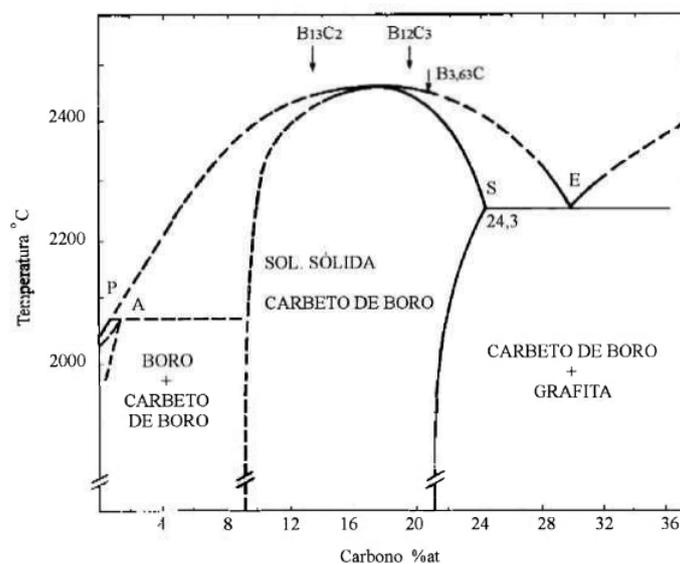


Figura 1 – Diagrama de fases para o sistema B-C à pressão ambiente (SANTOS, 1995).

Quando se analisa a região da estabilidade do B_4C na figura 1, em termos de composição, varia entre 9 e 21 at. % de concentração de carbono, isto é, $B_{10,4}C$ a B_4C . Por ser um material pulverulento, conforme figura 2, pode provocar intoxicação e irritação de vias nasais e mucosas quando em contato direto, recomendando-se a produção e o manuseio do B_4C com equipamentos de proteção individual no rosto, olhos e pele.



Figura 2 – Carbeto de boro na forma pulverulenta (TURATTI, 2009).

Turatti (2009) pesquisou sobre formas de sinterização do carbeto de boro com alta resistência ao desgaste, investigando a influência de vários parâmetros, como a granulometria do pó de partida, a adição de carbono e ligantes orgânicos, a temperatura máxima e a taxa de aquecimento no processo de sinterização.

Possui estrutura romboédrica, conforme figura 3, com baixa densidade e alto ponto de fusão, sendo extremamente duro e com propriedades nucleares excelentes. O B_4C resiste também à oxidação da atmosfera até $600\text{ }^\circ\text{C}$ devido à formação de um filme de B_2O_3 , sendo sua resistência química considerada excelente por reagir com halogênios sob altas temperaturas (AZoM, 2011; SMITH, HASHEMI, 2012).

As principais aplicações do B_4C estão na absorção de nêutrons térmicos em reatores nucleares, blindagem de aeronaves, tanques, veículos de combate e coletes a prova de balas, combustível em foguetes propulsores, abrasivos pulverulentos e fabricação de peças resistentes à abrasão (AZoM, 2011; TURATTI, 2009; SANTOS, 1995), porém apresenta uma tenacidade à fratura relativamente baixa ($2,8 - 3,3\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), restringindo sua aplicação como material estrutural.

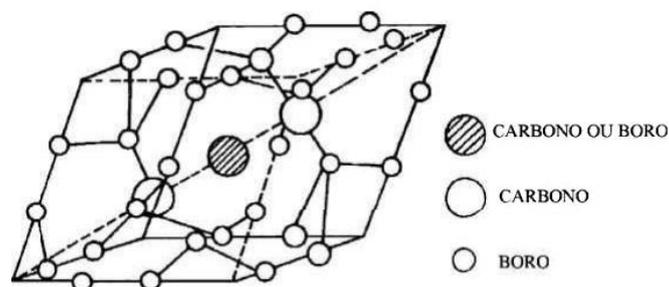


Figura 3 – Carbeto de boro – estrutura cristalina (SANTOS, 1995).

Quando é um sinterizado de alta qualidade, possui microdureza de 25-40 GPa, que varia conforme seu método de preparação, com condutividade térmica entre $29-67\text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ e condutividade elétrica à temperatura ambiente de $140\text{ }\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, permitindo que variações

estequiométricas do carbeto de boro possam apresentar comportamento metálico ($B_{13}C_2$) e/ou semicondutor com *gap* definido e identificado pelo cálculo da estrutura de bandas ($B_{12}C_3$) (SANTOS, 1995; SMITH, HASHEMI, 2012; DOMINICH et al, 2011; SURI et al, 2010).

Outro fator a ser observado, derivado da característica como semicondutor, está em ser do tipo *p*, onde a altas temperaturas possui uma concentração de poros entre 10^{17} e 10^{19} cm^{-3} , o que implica em ser promissor em aplicações de conversão termoelétrica direta de alta eficiência (SPOHN, 1995). Devido ao seu potencial de conversão termoelétrica, é usado como componente de combustíveis para foguetes propulsores quando combinado com oxigênio. Contudo, uma das grandes dificuldades do B_4C está em sua difícil sinterização, uma vez que sua expansão térmica é anisotrópica, podendo gerar trincas transgranulares em peças sinterizadas. Para melhor compreensão, a expansão térmica linear na direção $\alpha_c = 6,25 \times 10^{-6}$ $^{\circ}C$, enquanto nas direções $\alpha_{ab} = 5,29 \times 10^{-6}$ $^{\circ}C$ (TURATTI, 2009; TKACHENKO et al, 2007).

2. PROPRIEDADES DO B_4C

2.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Dureza. De acordo com Smith e Hashemi (2012), Callister e Reitwisch (2012) e Dieter (1981), a dureza é uma propriedade mecânica dos materiais que pode ter interpretações diversas, de acordo com a experiência do experimentador. Para o caso dos estudos envolvendo testes mecânicos, a dureza implica em quantificar a resistência à penetração de um material duro em outro, sendo as informações obtidas usadas para conhecer alguma informação sobre a resistência mecânica ou sobre o tratamento térmico submetido.

São observados geralmente três tipos gerais de dureza nos materiais, que são:

- Dureza ao risco;
- Dureza à penetração;
- Dureza dinâmica ou de rebote;

Onde as duas primeiras são observadas nos materiais cerâmicos. As medidas são realizadas com o auxílio de um indentador calibrado, geralmente de diamante em formato triangular ou de aço em formato esférico (CLINTON, MORRELL, 1987). Contudo, é salutar apontar que as medidas obtidas são de dureza relativa, não conferindo um alto nível de reprodutibilidade ou precisão. As medidas de dureza mais utilizadas possuem norma específica, das quais destacam-se a norma da American Society of Testing and Materials – ASTM C1326-13, que trata do método Knoop de mensuração da dureza e da ASTM C1327-15, que trata do método Vickers de mensuração da dureza de materiais cerâmicos.

Clinton e Morrell (1987) analisam as diferentes formas de mensurar a dureza dos materiais cerâmicos utilizando os métodos Rockwell, Vickers e Knoop, apontando as vantagens e desvantagens quando utilizados de acordo com a demanda especificada. Destaca-se que estes métodos de indentação servem para identificar não somente metais e ligas metálicas, mas expandem-se para materiais mais duros, inclusive cerâmicas e compósitos metálicos reforçados por materiais cerâmicos, como o B_4C , por exemplo.

Um ponto importante a ser observado, conforme Dieter (1981) e Galanov et al (2013), está na análise da zona plástica abaixo da impressão de dureza, onde esta é envolvida por um material elástico que desempenha uma restrição ao escoamento plástico. E desta forma, a tensão compressiva média necessária para causar o escoamento plástico e avaliar a dureza do B_4C é maior do que no caso de compressão simples. E isto implica na dificuldade em se precisar uma carga necessária para criar uma moosa em um sólido de forma a analisar a plasticidade do material.

Contudo, é importante ressaltar que Clinton e Morrell (1987) apontam diretamente que poucas cerâmicas são capazes de deformar homogeneamente sob tensão, sendo que estas possuem cinco sistemas independentes de deslizamento cristalográfico. Para a grande maioria dos materiais cerâmicos, a deformação plástica destes não pode ser acomodada sem haver algum nível de fratura. Destacam os autores que existem exceções quando as cargas aplicadas são pequenas demais, de forma que a energia de deformação seja insuficiente para nuclear as trincas.

Chen et al (2017) destacam em seu artigo a questão da mensuração da dureza segundo o método Vickers para identificar os pontos de concentração dos reforços aplicados na matriz, em função da pressão e temperatura de processamento do compósito, onde a fórmula para determinar a dureza neste método é conforme a equação 1 abaixo.

$$HV = 1854,4 \frac{P}{d^2} \quad (1)$$

Onde P é a carga aplicada e “d” é a média aritmética das duas diagonais do indentador em micrômetros (μm). Com o método executado, os autores observaram que a dureza aumenta com a temperatura de sinterização em certa condição de pressão e sob uma carga estabelecida de 29,4 N variando a pressão de processamento das amostras em 3 e 4 gigapascals (GPa) e temperaturas variando entre 700 e 1500 °C.

Ipekoglu et al (2017) caracteriza mecanicamente compósitos de alumínio reforçados com B₄C produzidos pela técnica *squeeze casting*, onde aponta que o B₄C é o terceiro material mais duro, com 3800 HV, sendo apenas o diamante e o nitreto de boro mais duros, destacando também a alta resistência mecânica, a baixa densidade comparada com outros carbetos e a boa estabilidade química, com boa compatibilidade de interface com o alumínio. A metodologia implicou em analisar a dureza das amostras desenvolvidas, variando a composição e a pressão utilizada no processamento, de acordo com o método Brinell, aplicado em metais, onde se utilizou a norma ASTM E8 com uma máquina de teste universal com célula de carga de 10 kN.

Seus resultados apontam que a pressão possui efeito limitado no aumento da dureza das amostras, sendo que a composição é o fator principal e após a inserção do B₄C, a variação de concentração deste influi significativamente comparando com a matriz referencial; contudo, o ganho de dureza variando as concentrações é de apenas 10% quando comparadas as amostras com 3% e 10% de B₄C.

Resistência à fratura frágil. As cerâmicas, de acordo com Smith e Hashemi (2012), Callister e Reitwisch (2012), Carter e Norton (2007) e Barsoum (2003), tanto as cristalinas quanto as amorfas fraturam em respostas às mínimas deformações que estejam submetidas, antes mesmo que possa ocorrer uma deformação plástica como é observada nos metais.

Os autores acima apontam ainda que os limites de resistência medidos para a maioria dos materiais cerâmicos são substancialmente inferiores que os estimados teoricamente a partir das forças de ligação interatômicas, incluindo os carbetos. Tal situação é explicada pela existência de defeitos que são onipresentes nos materiais cerâmicos, que são concentradores de tensões, onde a magnitude da tensão de tração aplicada é amplificada, não havendo quaisquer mecanismos de deformação plástica que desacelerem ou desviem as trincas.

Smith e Hashemi (2012) e Barsoum (2003) afirmam que a habilidade dos materiais cerâmicos resistirem à fratura frágil quando há a presença de uma trinca é especificada em termos de tenacidade à fratura, que é observada matematicamente conforme equação 2.

$$K_{Ic} = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

Onde K_{Ic} é a tenacidade à fratura em deformação plana, Y é um parâmetro ou função adimensional dependente da geometria da amostra e da trinca, σ é a tensão aplicada e “ a ” é o comprimento da trinca superficial ou a metade do comprimento de uma trinca interna. Os autores ainda destacam que pode ocorrer a fratura por fadiga estática, quando as trincas se propagam lentamente, as tensões são de natureza estática e o lado direito da eq. 2 for inferior que K_{Ic} . Implica-se nesta informação que este tipo de fratura é sensível às condições ambientais, especialmente quando há a presença significativa de umidade na atmosfera. E este mecanismo provavelmente é gerado pela corrosão sob tensão nas extremidades, isto é, nos contornos de superfície (ZHANG et al, 2018).

Observação esta foi feita por Shorowordi et al (2003) que avaliam as características da microestrutura de compósitos de matriz de alumínio reforçados por B_4C , SiC e Al_2O_3 em modo de estudo comparativo. Para o B_4C , os autores realizam um pré-aquecimento a $175\text{ }^\circ\text{C}$ por 2 horas e adicionados à matriz fundida no cadinho através de mistura mecânica, adicionando sob agitação mecânica um percentual de 13% em volume fracionário durante 30 minutos e mais 16 minutos de agitação pós-adição. Para a redução da porosidade, os compósitos são moldados em molde cilíndrico de grafite; e para melhorar a distribuição de partículas na matriz de Al, as amostras foram submetidas ao processo de extrusão a quente sob temperatura de $420\text{ }^\circ\text{C}$ durante com uma taxa de extrusão de 27 com velocidade de 1m/minuto, sendo então tratadas termicamente a $400\text{ }^\circ\text{C}$ por duas horas e resfriadas em forno para remover os efeitos da extrusão.

Os resultados obtidos pelos autores apontam que a macroestrutura do sistema Al- B_4C apresentou um resultado positivo quanto à porosidade. E que apesar do reforço reagir facilmente com o ar em temperaturas elevadas, o ar aprisionado com as partículas de B_4C reagem com o B_4C dentro do fundido, o que supõem reduzir a quantidade de poros. E desta forma, dificulta a propagação de trincas e minimiza as possibilidades de fratura. Observaram também que há um aumento da molhabilidade do B_4C com a matriz devido à formação de B_2O_3 líquido nas superfícies das partículas do reforço.

2.2. Propriedades térmicas e de interface

Área Superficial Específica, Adsorção e Dessorção. A Área Superficial Específica (ASE) é descrita como sendo a relação entre a quantidade de superfície ocupada por unidade de massa, onde é analisada de acordo com a porosidade das partículas que compõem os materiais cerâmicos (CESSA et al, 2009; REIS, 2013). Esta propriedade se mostra de relativa importância quando se trata do uso de reforços cerâmicos, em particular o B_4C , no qual é um material com forte ligação covalente e que possui condições específicas de adsorção devido à sua ampla variação de composições, desde $B_{10.5}C$ até B_4C (AIZENHSTEIN et al, 2014).

Cessa et al (2009) destacam que a porosidade das partículas influencia o tamanho da ASE, no qual microporos possuem elevada área superficial interna e contribuem significativamente para o aumento da ASE. A ASE é formada pela área superficial interna, característica fortemente observada em cerâmicas eudrais, que são formadas pelas paredes dos sulcos, poros e cavidades com profundidades maiores do que o comprimento e cuja abertura é voltada para o exterior. Já a área superficial externa é constituída pela superfície dos meso e macroporos, aumentando quando a superfície do sólido apresenta imperfeições na forma de sulcos e fissuras com dimensões maiores em comprimento do que em profundidade.

Reis (2013) aponta que a ASE atua como função da adsorção/dessorção observada nas superfícies dos sólidos, que é o processo de transferência de um ou mais constituintes, denominados adsorvatos, de uma fase fluida para a superfície de uma fase sólida, denominada

adsorvente. Desta forma, as moléculas presentes na fase fluida são atraídas para a interface devido à existência de forças atrativas não compensadas na superfície do adsorvente.

Destaca-se que o processo de adsorção/dessorção, segundo a autora supracitada, pode ocorrer tanto por fisissorção (mecanismo físico) quanto por quimissorção (mecanismo químico). Para o B_4C , ao ser utilizado como reforço de matrizes metálicas, em particular o cobre, ocorre a fisissorção, cuja adsorção é observada pelas forças de Van der Waals. Esta ocorre quando forças intermoleculares de atração entre as moléculas do fluido e a superfície do sólido são maiores do que as forças de atração entre as moléculas do fluido. A estrutura molecular ou a natureza do adsorvente é particularmente importante no ordenamento do grau de adsorção que pode ocorrer, assim como o tipo e a localização dos grupos funcionais responsáveis afetam sua adsorbabilidade.

Soma-se a estes fatores as dimensões moleculares do adsorvato, onde diâmetros moleculares menores têm mais facilidade em difundir-se para o interior do sólido e consequentemente aumentar a adsorção (QIAO et al, 2015) e a formação de uma camada adsorvida numa superfície não é um processo instantâneo, mas que é afetada pela velocidade de difusão da substância tensoativa através da solução em direção à interface.

Desta forma, esta propriedade se caracteriza também dentro da questão dos sistemas argila-água, onde ocorrem os processos de troca catiônica e são analisadas as capacidades de cada constituinte, conforme Santos descreve (1989) e pode ser comparado no processo de adsorção do reforço em relação à matriz na qual o B_4C é inserido, uma vez que as forças interfaciais dependem diretamente da ASE disponível para que a molhabilidade do reforço seja suficiente.

Propriedades térmicas. Aizenhstein et al (2014) analisaram o uso do B_4C com diversas matrizes metálicas reativas (Ti, Si, Al, Fe, Ni) e não reativas (Cu, Au, Ag, Sn) para identificar as propriedades termodinâmicas dos compósitos e relacionar o fenômeno da molhabilidade nos sistemas estudados com o objetivo de estabelecer os parâmetros tecnológicos requeridos para a produção de cermetos baseados em B_4C .

O procedimento implicou na produção de substratos por polimento com pasta abrasiva e limpeza cuidadosa, com execução em fornos sob vácuo a 1150 °C, cujas ligas foram preparadas em fornos de arco elétrico e depois as amostras foram seccionadas e polidas com pasta de diamante e lixa de SiC. Analisou-se termodinamicamente os sistemas Cu-C e Cu-B.

O resultado termodinâmico aponta que a solubilização do carbono é muito baixa a 1200 °C e não há a formação de fase de carbetos no sistema Cu-C, enquanto no sistema Cu-B gerou uma reação eutética a 13,3 at% e 1013 °C, sendo a solubilidade do boro no Cu líquido a 1200 °C aproximadamente em 25 at%. Como não houve formação de fase ternária Cu-B-C, uma secção isotérmica para o sistema foi construído, conforme figura 4.

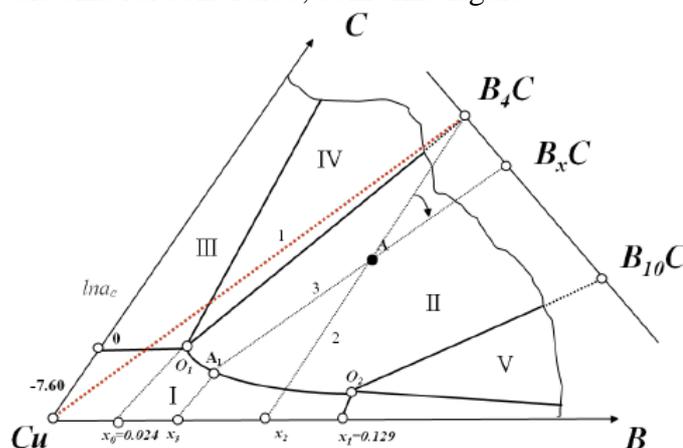


Figura 4 – Seção isotérmica esquemática do diagrama de fase ternário Cu-B-C a 1200 °C (a região rica em cobre está fora de escala) (AIZENHSTEIN et al, 2014).

Onde I representa a região de fase simples da solução líquida (LS) de Cu-B-C, II é a região com duas fases da LS variando a concentração de B₄C, III é a região com duas fases da LS mais a grafita, IV é a região de três fases com LS (ponto O₁ + grafite + B₄C), V é a região de três fases com LS (ponto O₂+B+ B₁₀C, saturado com Cu), VI é região com duas fases da LS (ponto O₂+B, saturado com Cu).

Observou-se também um ângulo de contato de 110° para o Cu no substrato do B₄C a 1150 °C após 30 minutos de contato. Como resultado, o carbono dissociou-se do carbetto e formou uma camada superficial fina localizada na interface inicial do substrato com o metal, de forma que a adição de boro se faz necessária para evitar que o carbono forme aglomerados dispersos no metal fundido e permita uma melhor molhabilidade entre os constituintes. Concluíram os autores que, devido a não formar carbetos ou boretos estáveis, o Cu não é apropriado para molhar a superfície do B₄C, o que implica na necessidade de se utilizar agentes de fluxo que permitam melhorar a interface e garantir que haja um ganho de propriedades desejadas, como a adição de Si para reduzir a quantidade de carbono livre no sistema ou a adição de Al para formar fases de borocarbeto na interface.

O B₄C, de acordo com Bai et al (2013), possui propriedades como resistência mecânica, alta capacidade de absorção de nêutrons, alto ponto de fusão, boa resistência a corrosão. Contudo, uma desvantagem está na baixa condutividade térmica do mesmo e para compensar esta desvantagem, os autores inserem o B₄C revestido com uma camada de cobre na superfície do pó pelo método de co-deposição superficial aquosa eletrolítica para alterar a natureza da interface metal-cerâmica.

Para melhorar a interface da superfície do B₄C, os autores fizeram um pré-tratamento no pó com solução concentrada de ácido nítrico, de forma a erodir os pites côncavos da superfície das partículas e, em seguida, lavaram com água deionizada para remover o ácido nítrico e removeram as impurezas com acetona, sendo então imersas em uma solução coloidal salina de paládio a 50 °C durante 180 minutos para posterior enxague em água deionizada. E então a placa de cobre eletrolítico cobrindo as partículas de B₄C foi colocada em uma célula com capacidade de 2000 cm³ para analisar a condutividade térmica segundo norma ASTM E1225-13.

Os resultados obtidos mostram que o B₄C teve uma boa interface de contato com o cobre, porém não reage com o cobre para formar boretos. Analisou-se também que o coeficiente de expansão térmica do compósito aumenta a medida que a fração de B₄C diminui na composição. Contudo, quando a fração volumétrica do B₄C está no intervalo entre 40 e 70%, os compósitos com coeficiente de expansão térmica relativamente baixos terão uma excelente condutividade térmica.

3. CONCLUSÕES

Averigua-se que o B₄C possui características ímpares em relação aos demais boretos devido a sua amplitude de composições estequiométricas, reagindo facilmente com metais como o titânio, silício, alumínio, ferro e níquel para formarem novos boretos. Suas propriedades mecânicas possuem diferencial pelo altíssimo nível de dureza obtido (3800 HV), a capacidade de absorção de nêutrons, boa resistência química a ambientes ácidos e alcalinos, porém possui baixa estabilidade termodinâmica quando submetido a altas temperaturas em matrizes fundidas. Distingue-se que existe uma melhor compatibilidade superficial entre o B₄C e metais como alumínio e titânio, em detrimento de metais como o cobre e o estanho.

Outro ponto destacável está na aplicabilidade do B_4C , que se apresenta mecanicamente como excelente reforço para melhorar a dureza dos compósitos, o que implica em melhoria da tenacidade à fratura e resistência à punctura, de forma que possa ser utilizado com grande amplitude dentro de aplicações que exijam tais propriedades. Contudo, é importante observar que o B_4C exige também processamentos específicos para tentar otimizar o processo de interface do substrato com a matriz, uma vez que a dissolução do boro e a liberação do carbono na matriz selecionada para a tese, que é o cobre, prejudica as propriedades mecânicas devido ao aumento significativo da porosidade na macroestrutura do compósito, além da formação de camada de carbono na superfície da amostra.

Sugere-se então utilizar agentes de fluxo que contribuam para reduzir a quantidade de carbono livre oriundo da dissolução do B_4C em matrizes fundidas e que possa se aplicar o uso de ligas que envolvam o uso não exclusivo do cobre, mas do cobre com o alumínio ou o ferro para melhorar a questão da interface com o B_4C e obter os ganhos de propriedade desejados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aizenstein, M.; Froumin, N.; Frage, N. (2014) “*Experimental study and thermodynamic analysis of high temperature interactions between boron carbide and liquid metals*”, Engineering, 6, 849-868.
- AZoM. (2011) “*Boron carbide (B_4C) – properties and information about boron carbide*”, Disponível em <https://www.azom.com> Publicado em 9/2/2011. Acesso em 23 junho 2018.
- Bai, H.; Ma, N.; Lang, J.; Jin, Y.; Zhu, C.; Ma, Y. (2013) “*Thermo-physical properties of boron carbide reinforced copper composites fabricated by electroless deposition process*”, Material Design, 46, 740-5, 2013.
- Barsoum, M. W. (2003) *Fundamentals of ceramics*, Institute of Physics Publishing, Philadelphia – USA.
- Callister, W. D.; Reitwisch, D. G. (2012) *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*, 8ª edição, LTC, Rio de Janeiro.
- Carter, C. B.; Norton, M. G. (2007) *Ceramic materials: science and engineering*, Springer, Amsterdã, Londres, Nova Iorque.
- Cessa, R. M. A. et al. (2009) *Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois latossolos vermelhos*, Revista Brasileira de Ciências do Solo, 33, 1153-1162.
- Chen, H.; Liang, H.; Liu, L.; Li, H.; Liu, K.; Peng, F. (2017) *Hardness measurements for high-pressure prepared TaB and nano-TaC ceramics*, Res. Phys., 7, 3859-3862.
- Clinton, D. J.; Morrell, R. (1987) *Hardness testing of ceramic materials*, Mat. Chem. Phys., 17, 461-473.
- Dieter, G. E. (1981) *Metalurgia mecânica*, 2ª edição, Guanabara Dois, Rio de Janeiro.
- Domnich, V.; Reynaud, S.; Haber, R. A.; Chhowalla, M. (2011) *Boron carbide: structure, properties and stability under stress*, Journal of American Ceramic Society, vol 94, n. 11, 3605-3628.
- Galanov, B. A. et al. (2013) *Penetration resistance of B_4C - CaB_6 based light-weight armor materials*, Procedia Engineering, 58, 328-337.
- Ipekoglu, M. et al. (2017) *Mechanical characterization of B_4C reinforced aluminum matrix composites produced by squeeze casting*, Journal of Materials Research, vol 32, n. 3, 599-605.
- Pierson, H. O. (1999) *Handbook of chemical vapor deposition (CVD): principles, technology and applications*, 2nd edition, Noyes Publication/William Andrew Publishing, Norwich – UK.
- Qiao, Y. et al. (2015) *Boron carbide composite ceramic preparation and corrosion behavior in simulated seawater*, Ceramics International, vol 41, n. 3, 5026-5031.
- Reis, D. C. N. S. P. (2013) *Importância do estudo da área superficial específica e porosidade do estearato de magnésio para o setor farmacêutico*, Monografia, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro.
- Santos, N. A. (1995) *Estudo do processo de sinterização do carbetto de boro com adição de carbono*, Dissertação, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- Santos, P. S. (1989) *Ciência e tecnologia de argilas*, 2ª edição, Volume 1, Edgar Blucher, São Paulo.
- Shorowordi, K. M. et al. (2003) *Microstructure and interface characteristics of B_4C , SiC and Al_2O_3 reinforced Al matrix composites: a comparative study*, Journal of Materials Processing Technologies, 142, 738-743.
- Smith, W. F.; Hashemi, J. (2012) *Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais*, 5ª edição, Traduzido da edição norte-americana, AMGH Editora Ltda, Porto Alegre.
- Spohn, M. T. (1995) *Boron carbide*, American Ceramic Society Bulletin, vol 74, n. 6, 113-115.

- Suri, A. K.; Subramanian, C.; Sonber, J. K.; Murthy, T. S. R. C. (2010) *Synthesis and consolidation of boron carbide: a review*, Int. Mater. Rev., vol 55, n. 1, 4-40.
- Tkachenko, Y. G. et al. (2007) *Temperature effect on bending strength of hot-pressed boron carbide materials*, Powder Metallurgy, Metals and Ceramics, vol 46, n 5-6, 254-260.
- Turatti, A. M. (2009) *Sinterização de carbeto de boro com alta resistência ao desgaste*, Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Zhang, L. et al. (2018) *Microtopography and mechanical properties of vacuum hot pressing Al/B₄C composites*, Ceramic International, vol 44, n. 3, 3048-3055.