cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

Desenvolvimento e Caracterização de Novos Cermets Al2O3-L5.1 com Diferentes Frações de Liga

Odirlei Amaro Ferreira[1]; José Martins de Oliveira Junior[1]
[1]Universidade de Sorocaba - Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais (PPGPTA/UNISO)

Introdução

O desenvolvimento de compósitos cerâmica–metal (cermets) com propriedades físicas e microestruturais controladas representa uma alternativa para aplicações industriais que exigem elevada dureza, estabilidade dimensional e resistência ao desgaste. Entre os materiais promissores, destacam-se os compósitos constituídos por alumina (Al_2O_3) e pela liga metálica multicomponente L5.1 ($AlCrFe_3MoNbTiV$), obtidos por metalurgia do pó.
A determinação da densidade e a caracterização morfológica tridimensional são fundamentais para compreender os efeitos da composição e do processamento sobre a estrutura desses materiais. A picnometria de hélio permite determinar a densidade associada ao volume não acessível ao gás, enquanto a microtomografia computadorizada de raios X (micro-CT) possibilita analisar tridimensionalmente características geométricas e heterogeneidades internas.
Neste estudo, essas técnicas foram utilizadas para investigar a densidade picnométrica e a morfologia de compósitos Al_2O_3–L5.1 com diferentes concentrações da fase metálica, buscando identificar tendências experimentais e limitações na determinação quantitativa das características microestruturais.

Objetivos

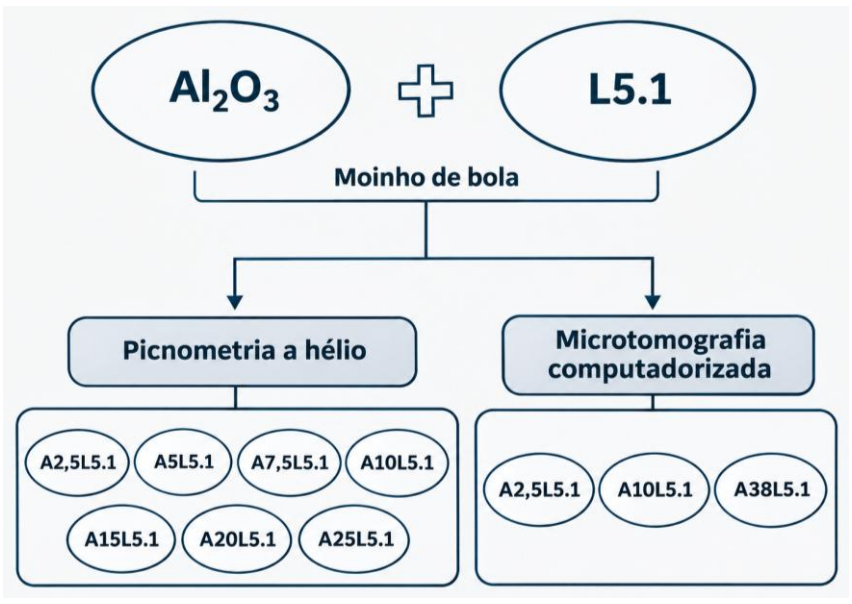
Objetivo geral: Avaliar a densidade picnométrica e as características morfológicas tridimensionais de compósitos Al_2O_3–L5.1 obtidos por metalurgia do pó, investigando a influência da concentração da liga metálica sobre os resultados experimentais.

Objetivos específicos:
Determinar a densidade de amostras de Al_2O_3, liga L5.1 e compósitos com diferentes concentrações metálicas por picnometria de hélio.
Comparar as densidades experimentais com os valores teóricos calculados pela regra das misturas.
Caracterizar tridimensionalmente os compósitos A2,5L5.1, A10L5.1 e A38L5.1 por microtomografia computadorizada.
Avaliar parâmetros morfológicos, incluindo volume segmentado, espessura estrutural, separação, anisotropia e dimensão fractal.

Metodologia

Os compósitos Al_2O_3–L5.1 foram produzidos por metalurgia do pó, envolvendo pesagem, mistura nesta primeira etapa do estudo.
A densidade picnométrica foi determinada em equipamento Quantachrome Ultrapyc 1200e, utilizando gás hélio, com temperatura de análise próxima de 20,6 °C e pressão-alvo de 17,0 psig. Foram analisadas nove amostras, identificadas pelos códigos 00 a 08, incluindo alumina preparada, liga L5.1 e compósitos contendo 5%, 7,5%, 10%, 15%, 20% e 25% em massa de liga metálica. A formulação A7,5L5.1 foi representada por duas amostras distintas.
As análises morfológicas foram realizadas por microtomografia computadorizada de raios X nas composições A2,5L5.1, A10L5.1 e A38L5.1. As reconstruções foram processadas no software CT Analyser, versão 1.20.8.0, com tamanho de pixel de aproximadamente 6,70 µm, utilizando 101 seções tomográficas por amostra.
Foram extraídos parâmetros tridimensionais de volume segmentado, espessura estrutural, separação, número de objetos, dimensão fractal, anisotropia e porosidade calculada pelo software.
As densidades experimentais foram comparadas com os valores teóricos calculados pela regra das misturas, considerando as densidades de referência de 3,980 g/cm³ para Al_2O_3 e 7,166 g/cm³ para L5.1.

Figura 1. Fluxograma da metodologia



Resultados e Discussão

Picnometria de hélio
As densidades picnométricas variaram entre 4,2652 e 7,3415 g/cm³, considerando todas as amostras analisadas. A alumina preparada apresentou densidade de 4,2652 g/cm³, enquanto a liga L5.1 atingiu 7,3415 g/cm³.
Entre os compósitos, foram obtidas densidades de 4,5093 g/cm³ para A5L5.1, 4,5485 g/cm³ para A10L5.1, 4,7322 g/cm³ para A15L5.1, 4,9499 g/cm³ para A20L5.1 e 5,6721 g/cm³ para A25L5.1.
As duas amostras identificadas como A7,5L5.1 apresentaram densidades de 5,5503 e 4,6570 g/cm³, evidenciando diferenças expressivas entre os resultados de uma mesma composição nominal. Todas as densidades picnométricas determinadas foram superiores aos valores calculados pela regra ideal das misturas.

Microtomografia computadorizada
Os compósitos apresentaram diferenças nos parâmetros morfológicos tridimensionais.
A2,5L5.1 apresentou volume segmentado de 39,24%, espessura estrutural de 22,51 µm e grau de anisotropia de 1,260.
A10L5.1 apresentou volume segmentado de 38,53%, maior espessura estrutural entre as amostras analisadas, de 26,15 µm, e separação estrutural de 33,68 µm.
A38L5.1 apresentou volume segmentado de 36,70%, espessura estrutural de 22,16 µm e maior número de objetos identificados pelo software, totalizando 41.093.
As porosidades totais calculadas pelo processamento tomográfico foram de 60,76%, 61,47% e 63,30%, respectivamente.

Figura 2. Desnidade por picnometria de hélio

Código	Composição	Densidade (g/cm³)	CV (%)
00	**Al_2O_3**	4,2652	0,1059
01	**L5.1**	7,3415	0,5894
02	**A5L5.1**	4,5093	0,5424
03	**A7,5L5.1**	5,5503	0,6604
04	**A10L5.1**	4,5485	0,6401
05	**A15L5.1**	4,7322	0,9346
06	**A20L5.1**	4,9499	0,7028
07	**A25L5.1**	5,6721	1,0334
08	**A7,5L5.1**	4,6570	0,7269

Figura 3.Morfologia tridimensional por micro-CT.

Parâmetro	A2,5L5.1	A10L5.1	A38L5.1
Volume segmentado (%)	**39,24**	38,53	36,70
Espessura estrutural (µm)	**22,51**	26,15	22,16
Separação estrutural (µm)	**28,65**	33,68	29,16
Número de objetos	**35.191**	21.215	41.093
Dimensão fractal	**2,822**	2,837	2,810
Anisotropia	**1,260**	1,099	1,156
Porosidade reportada (%)	**60,76**	61,47	63,30

Os resultados de picnometria indicaram uma tendência geral de aumento da densidade experimental com a incorporação de maiores concentrações de liga L5.1, comportamento qualitativamente compatível com a maior densidade da fase metálica em relação à alumina.Entretanto, os valores experimentais apresentaram desvios positivos em relação às densidades teóricas calculadas, atingindo aproximadamente 34,80% na amostra A7,5L5.1 identificada pelo código 03. A diferença de 0,8933 g/cm³ entre as duas amostras A7,5L5.1 também evidencia a necessidade de investigar a reprodutibilidade e as condições de preparação e medição dos materiais.
A análise por microtomografia revelou diferenças geométricas entre as estruturas segmentadas. A amostra A10L5.1 apresentou os maiores valores de espessura e separação estrutural, enquanto A2,5L5.1 apresentou maior anisotropia.
Esses resultados demonstram a capacidade da micro-CT de fornecer parâmetros quantitativos de morfologia tridimensional. Contudo, sua interpretação física depende da identificação correta das fases representadas pela segmentação.
Os valores de porosidade tomográfica apresentaram divergências em relação às estimativas anteriormente obtidas por densidade relativa, indicando a necessidade de revisar os limiares de segmentação e os volumes de interesse.
Assim, a integração entre picnometria e microtomografia apresenta potencial para aprofundar o estudo da estrutura dos cermets, mas a determinação quantitativa da porosidade e a correlação direta entre técnicas dependem de validação complementar.

Conclusões

A caracterização por picnometria de hélio e microtomografia computadorizada permitiu obter informações complementares sobre a densidade e a morfologia tridimensional dos compósitos Al_2O_3–L5.1.
As densidades picnométricas apresentaram tendência geral de aumento com a concentração nominal da liga metálica, embora tenham sido identificados desvios em relação aos valores teóricos e diferenças entre amostras de mesma formulação.
A microtomografia evidenciou variações nos parâmetros de espessura estrutural, separação, anisotropia e volume segmentado, demonstrando sua aplicabilidade à investigação morfológica dos compósitos.
Entretanto, as divergências entre as estimativas de porosidade obtidas por diferentes métodos indicam a necessidade de validação dos procedimentos experimentais e de processamento das imagens.
Conclui-se que a combinação das técnicas constitui uma abordagem promissora para aprofundar a caracterização física e tridimensional dos cermets Al_2O_3–L5.1, fornecendo uma base experimental para estudos posteriores de densificação, distribuição de fases, conectividade e propriedades funcionais.

Referências e Agradecimentos

FERREIRA, O. A. Desenvolvimento de compósito cerâmica-metal de elevada dureza. Tese (Doutorado) - Universidade de Sorocaba, 2025. RESTIVO, T. A. G.; RESTIVO, G. M. G. Development of ultra-hard multi-component alloys. Journal of Materials Research, v.36, p.1316-1327, 2021. GARCÍA, J. et al. Cemented carbide microstructures: a review. Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials, v.80, p.40-68, 2019. ZHENGUI, Y.; STIGLICH, J. J.; SUDARSHAN, T. S. Nano-Grained Tungsten Carbide-Cobalt (WC/Co), 1998. Agradecimentos: Universidade de Sorocaba, PPGPTA/UNISO, laboratórios envolvidos e apoio técnico-científico do Prof. Dr. Thomaz Augusto Guisard Restivo.