



INFLUÊNCIA DO USO DE FORJAMENTO MULTIDIRECIONAL NA POROSIDADE DO ALUMÍNIO PROCESSADO POR METALURGIA DO PÓ

Leite, D. G. B.^{1,a,c}; Trajano, A. A.^{1,a,d}; Silva, N. A. N.^{2,b,e}; Aguilár, M. T. P.^{3,a,f}; Cetlin, P. R.^{4,a,g}

1. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
2. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.
3. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Departamento de Engenharia de Materiais e Construção. Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG. CEP 31270-901.
4. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Departamento de Engenharia Mecânica. Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG. CEP 31270-901.

^aAv. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG. CEP 31270-901. ^bMorro do Cruzeiro, Bauxita, Ouro Preto, MG. CEP 35400-000. ^cdavid-leite@ufmg.br (autor para correspondência). ^dtrajano@ufmg.com. ^e(nayara.neres@ufop.edu.br). ^fteresa@ufmg.br. ^gpcetlin@gmail.com.

RESUMO

Uma das possíveis rotas de reciclagem de alumínio é o processamento pela metalurgia do pó (MP), que proporciona a redução das emissões de poluentes e o aumento da eficiência do processo. Neste trabalho, é proposta uma variação do processamento de alumínio por MP, com a utilização de um processo de deformação plástica severa (SPD), o forjamento multidirecional (MDF). Após a caracterização, os pós foram compactados com o uso de 5 e 10 ciclos de MDF com amplitude de deformação de ~0,90 por ciclo e carga axial de 412 MPa. Parte do material foi sinterizado a 550°C por 90 minutos. Os materiais compactados, sinterizado ou não, foram analisados por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e tiveram sua porosidade medida com auxílio do software ImageJ. O resultado de porosidade para 5 e 10 ciclos foi 11,6% e 5,3% para o material não sinterizado e 3,9% e 3,0% para o sinterizado.

Palavras-chave: materiais, congresso, alumínio, metalurgia do pó, forjamento multidirecional.

INTRODUÇÃO

O alumínio é o metal não ferroso de maior produção e consumo na indústria [1], com sua utilização em crescimento devido à sua ampla aplicação e vantagens em comparação a outros materiais [2] [3] [4] [5] [6]. O alumínio primário é produzido pelo refinamento da bauxita em alumina pelo Processo de Bayer, seguido pelo refinamento da alumina em alumínio puro pelo Processo de Hall-Hérout [5].

Os processos industriais envolvidos no beneficiamento da bauxita para a produção de alumínio estão diretamente ligados a elevados gastos de energia elétrica e a emissão de poluentes associados ao efeito estufa, como óxidos e fluoretos de carbono. Estima-se que para a produção de 1 kg de alumínio são consumidos de 12,5 a 16 kWh de energia elétrica e que a pegada de carbono total do processo é de 14,3 kg de CO₂ [7]. No contexto atual de minimização de impactos ambientais, a reciclagem do alumínio ganha destaque como uma alternativa para atender à sua demanda e reduzir a necessidade de sua produção primária.

As possíveis rotas para a reciclagem do alumínio incluem a fusão, a extrusão, o forjamento e o processamento pela metalurgia do pó (MP). Dentre essas rotas, a MP se destaca por proporcionar a redução das perdas de material por oxidação, do gasto energético e das emissões de poluentes.

A porosidade é uma variável existente nos materiais processados por MP, visto que é responsável por afetar as propriedades mecânicas do material, e consequentemente o seu desempenho. Ela impacta no limite de escoamento, no limite de resistência, no módulo de elasticidade, na tenacidade e na ductilidade [8]. Além disso, o aumento da porosidade favorece a propagação de trincas no material, afetando seu comportamento em fadiga e em fratura [9].

Uma das características dos pós processados por deformação plástica severa (SPD) é a redução na porosidade. Trabalhos na literatura com forjamento direto a quente de pós de ligas de TiAl sugerem que tensões triaxiais compressivas e grandes deformações efetivas contribuem com a densificação de pós. Essa densificação ocorre tanto em decorrência do agrupamento e do rearranjo espacial nos estágios iniciais da compressão, quanto pela fragmentação de partículas e pela eliminação de contornos, resultantes da deformação severa [10]. Trabalhos com amostras prensadas e sinterizadas de nanocompósitos de carvão de titânio em matriz de alumínio na forma de pós submetidas ao processo de torção em alta pressão (HPT)

apontam que a aplicação de SPD, além de reduzir a porosidade, refina o tamanho de grão de pós processados pela MP [11]. No presente trabalho, foi proposto uma variação do processamento de alumínio por metalurgia do pó, com a utilização do processo de deformação plástica severa por forjamento multidirecional (MDF), por se tratar de uma técnica simples, de baixo custo e com maior viabilidade de aplicação em escala industrial, quando comparada as demais técnicas SPD [12].

MATERIAIS E MÉTODOS

O pó de alumínio atomizado comercialmente puro foi adquirido no mercado local e sua caracterização química é apresentada na Tabela 1.

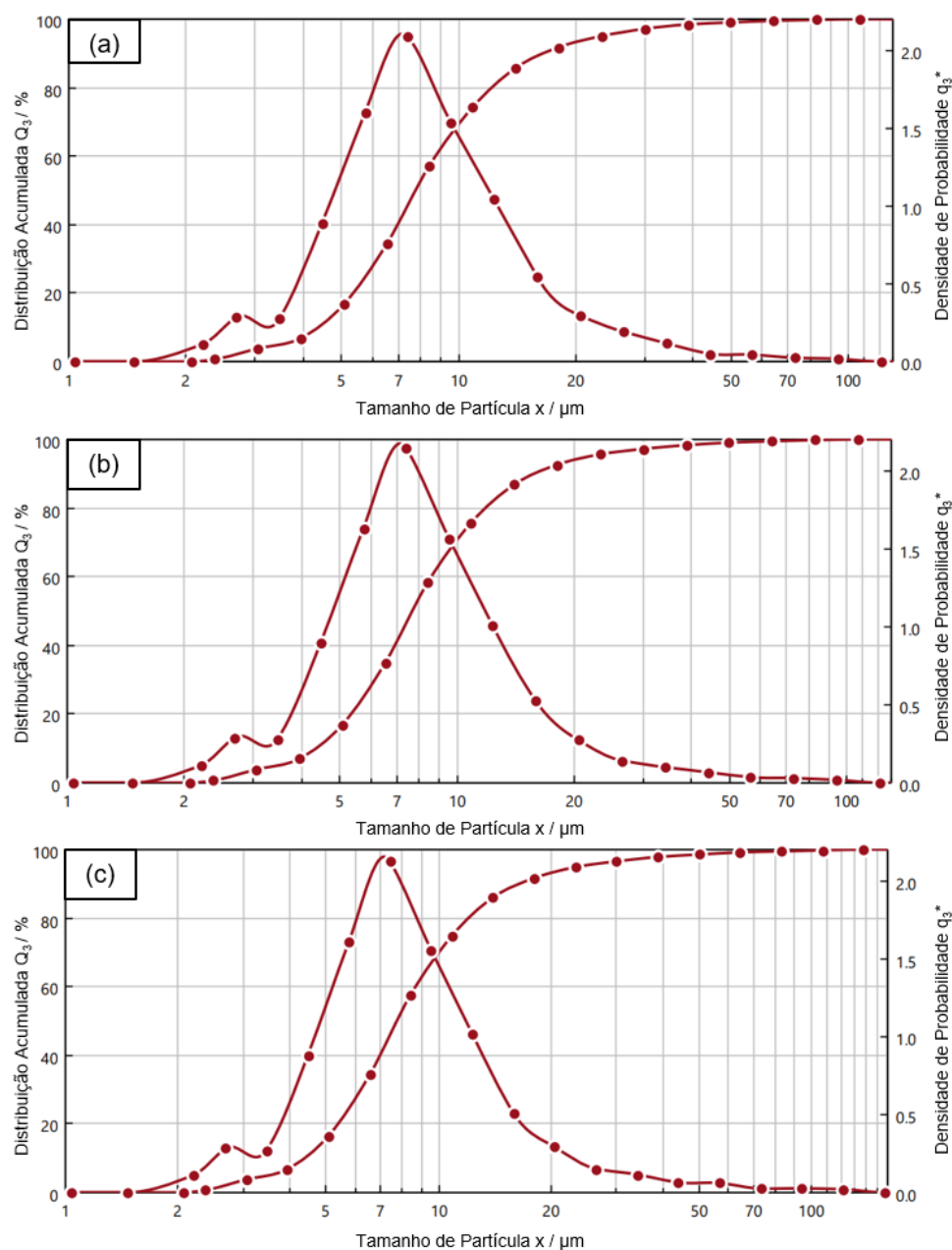
Tabela 1: Composição química dos pós utilizados em porcentagem em massa (%).

Elementos (% em massa)						
Al	Mn	Fe	Si	Cu	Zn	Pb
98,56	0,55	0,47	0,18	0,16	0,07	0,01

Fonte: Altom Metalurgia LTDA.

A caracterização dos pós foi realizada por meio de Análise Dinâmica de Imagem e de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A Análise Dinâmica de Imagem foi realizada pela empresa Sympatec GmbH no sensor de análise de imagem QICPIC/L, com dispersor OASIDRY/L e com um range M5 (tamanho de partículas entre 1,8 μm e 3,755 mm). As curvas de distribuição de tamanho de partícula obtidas para três amostras distintas do pó adquirido são apresentadas na Figura 1. O material apresentou um diâmetro médio de Sauter (SMD) entre 7,11 e 7,18 μm e um diâmetro mediano volumétrico (VMD) entre 9,86 e 10,38 μm .

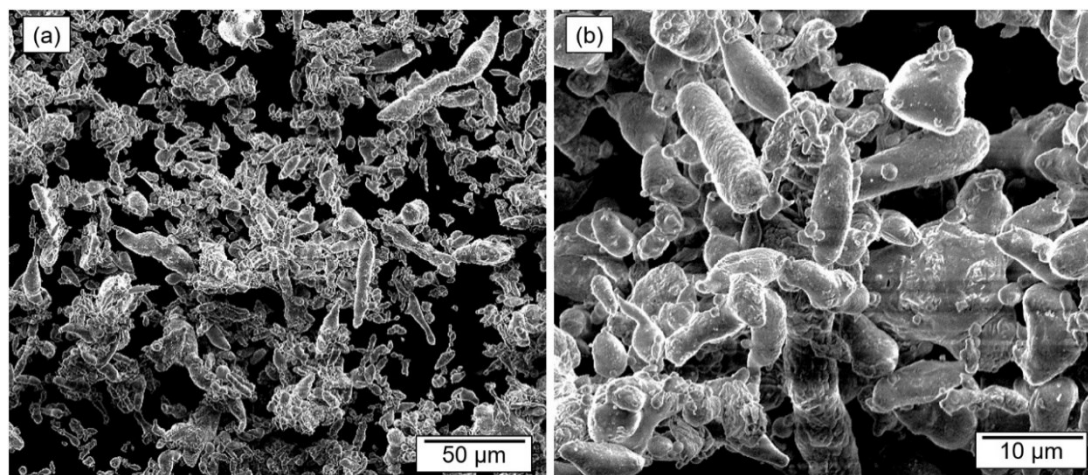
Figura 1: Curvas de distribuição acumulada e de densidade de distribuição de tamanho de partículas para três amostras distintas (a), (b) e (c).



Fonte: Sympatec GmbH (adaptada).

A análise por MEV foi realizada em um microscópio de feixe duplo FEI Quanta 3D FEG no Centro de Microscopia da UFMG. De acordo com os dados obtidos (Figura 2), as partículas apresentam, de modo geral, formas alongadas e tamanhos variados, prevalecendo as de maior razão de comprimento por largura.

Figura 2: Imagens de MEV dos pós de alumínio. (a) Ampliação de 500 vezes. (b) Ampliação de 2500 vezes.



Conhecidas as características, os pós foram compactados a temperatura ambiente em uma matriz fechada de aço AISI D2 temperado e revenido com seção interna de 11,19 x 13,00 mm. A altura dos corpos de prova (CP) após a compactação foi de cerca de 9,63 mm. Em cada ciclo de MDF, o CP era compactado em seus três eixos ortogonais, no sentido de sua maior dimensão, de modo que a amplitude de deformação por ciclo fosse de aproximadamente 0,90. A carga axial utilizada para as compressões foi de 60 kN, correspondendo a uma tensão de 412 MPa atuando sob os pós. Foram preparadas amostras submetidas a 5 e a 10 ciclos de MDF. Após a compactação, parte dos corpos de prova compactados foram submetidos à sinterização a 550°C por 90 min em um forno tipo mufla com capacidade de atingir 800°C.

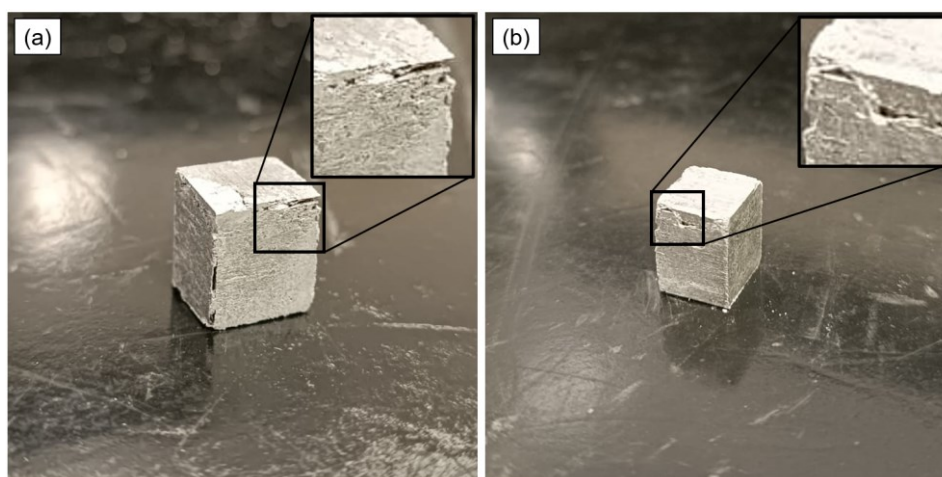
Os materiais compactados não-sinterizados e sinterizados foram caracterizados por MEV no Centro de Microscopia da UFMG. Para a preparação das amostras para o MEV, os CP de prova foram cortados e embutidos em resina epóxi. As amostras foram lixadas em lixas de carboneto de silício de granulometria 600# e 1200# e polidas com pastas de diamante de 9,3 e 1 µm. Destaca-se que durante a etapa de lixamento, ocorreu o desprendimento de material da superfície, gerando riscos nas amostras para a microscopia. Para minimizar a influência dos riscos na medição da porosidade, as imagens de MEV obtidas foram tratadas no software ImageJ. O tratamento das imagens se consistiu no ajuste da nitidez, do contraste e do brilho de modo a minimizar os riscos superficiais decorrentes do processo de lixamento e permitir a distinção clara entre os poros e vazios e o material consolidado.

A porosidade do material foi medida utilizando a ferramenta de análise de partículas no ImageJ nas imagens de microscopia tratadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os corpos de prova (CP) não sinterizados após 5 e 10 ciclos de compactação por MDF podem ser vistos na Figura 3. É possível observar que os corpos de prova apresentam superfícies não homogêneas, com maior concentração de vazios, poros e outros defeitos próximos às arestas. Esse resultado indica que a densidade relativa do material processado não é uniformemente distribuída pelo corpo de prova. Esse resultado está em acordo com a literatura e pode ser explicado pela diferença das tensões atuantes em cada direção ao longo do CP e na distribuição não uniforme da deformação efetiva [10]. O contato dos pós com a parede sob altas pressões favorece o atrito com a matriz metálica e a adesão do material nas paredes da matriz. Desse modo, quanto mais afastado das paredes e mais próximo do centro do CP, menor a interferência de efeitos de superfície e mais homogêneas as tensões compressivas. Consequentemente, as regiões centrais apresentam maior consolidação, enquanto as arestas apresentam maior quantidade de defeitos.

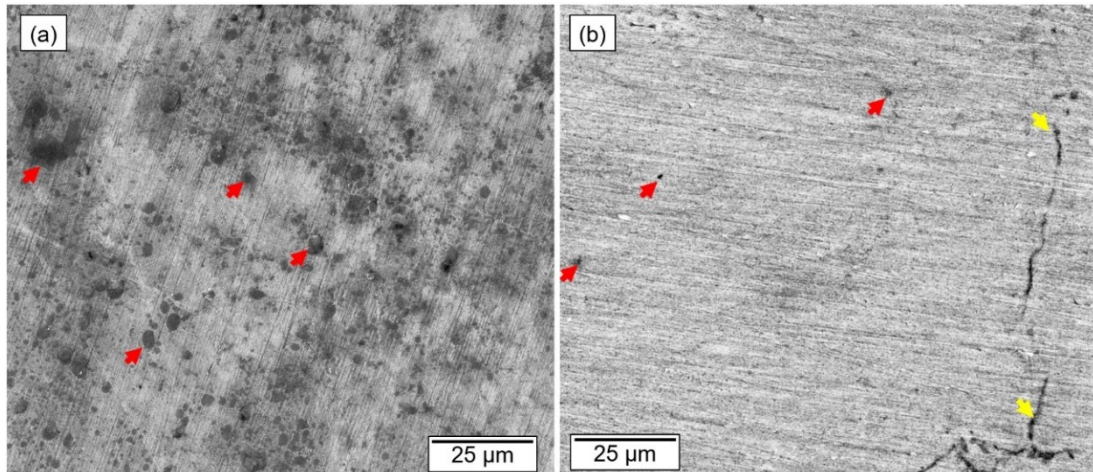
Figura 3: Corpos de prova compactados não sinterizados. (a) 5 ciclos de MDF. (b) 10 ciclos de MDF.



Na Figura 4 são apresentadas as imagens de MEV para as amostras não sinterizadas. É possível observar na amostra submetida a 5 ciclos de MDF a presença de vazios em formato circular (destacados pelas setas vermelhas na Figura 4 (a)) em praticamente toda a área analisada. Já na amostra submetida a 10 ciclos, a presença

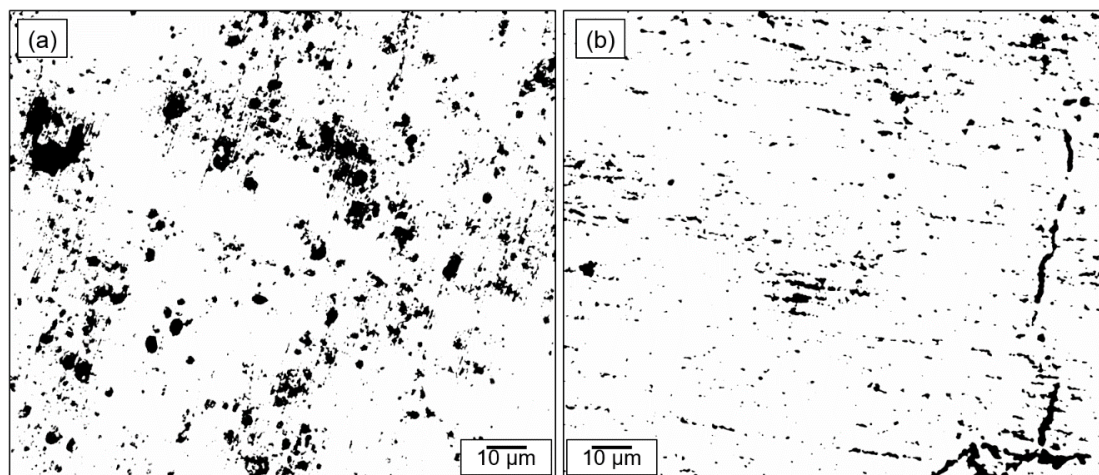
desses poros circulares não é tão evidente. Todavia, esta amostra possui defeitos lineares (destacados pelas setas amarelas na Figura 4 (b)) que indicam vazios não preenchidos durante a compactação.

Figura 4: Imagens de MEV das amostras não sinterizadas (a) 5 ciclos, (b) 10 ciclos.



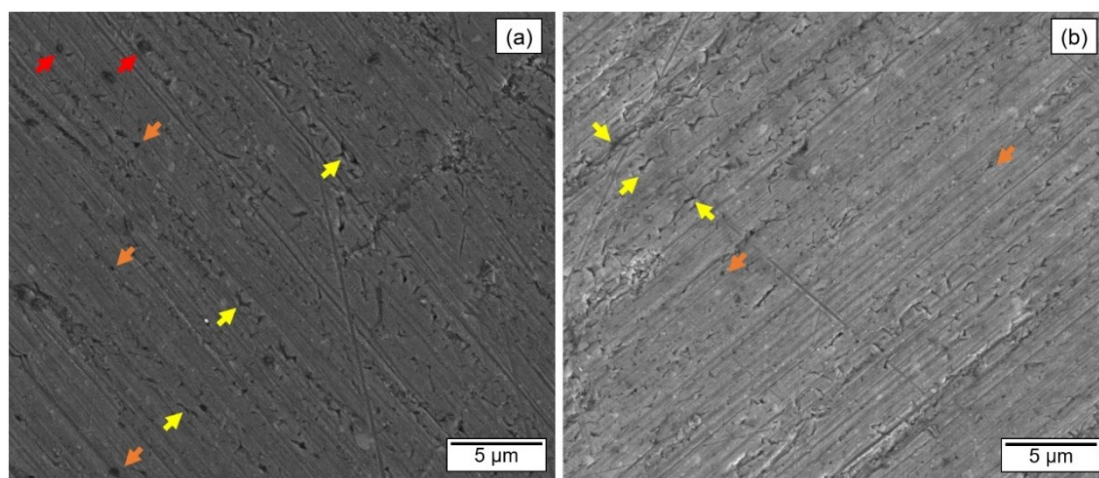
A Figura 5 apresenta as imagens de MEV após o tratamento para as amostras com 5 e 10 ciclos de MDF. Nas imagens, a área preta corresponde aos poros e aos vazios no material, enquanto a área branca corresponde ao material densamente compactado. Observa-se que, mesmo após o tratamento de imagem, nem todos os riscos superficiais foram eliminados. A porosidade medida pela análise das imagens foi de 11,6% para as amostras com 5 ciclos de MDF e de 5,3% para a com 10 ciclos. Como observado nas imagens antes do tratamento, os poros na amostra com 5 ciclos apresentam preferencialmente formato circular, e estão uniformemente distribuídos, enquanto para 10 ciclos, é possível observar vazios com formato linear e poros circulares com menor diâmetro.

Figura 5: Área de poros medida para as amostras não sinterizadas (a) 5 ciclos, (b) 10 ciclos.



As imagens de MEV das amostras sinterizadas estão apresentadas na Figura 6. Analisando a figura, é possível perceber que tanto o material submetido a 5 ciclos de MDF quanto o material submetido a 10 ciclos de MDF apresentam um aspecto visual semelhante quanto à porosidade e aos defeitos superficiais. Os vazios presentes nas amostras possuem geometria preferencialmente alongada e irregular (setas amarelas) com a presença de alguns poros quadrados ou triangulares (setas laranjas). Poros circulares (setas vermelhas) foram identificados apenas para a amostra submetida a 5 ciclos de compressão, porém em pequena quantidade em relação às demais discontinuidades.

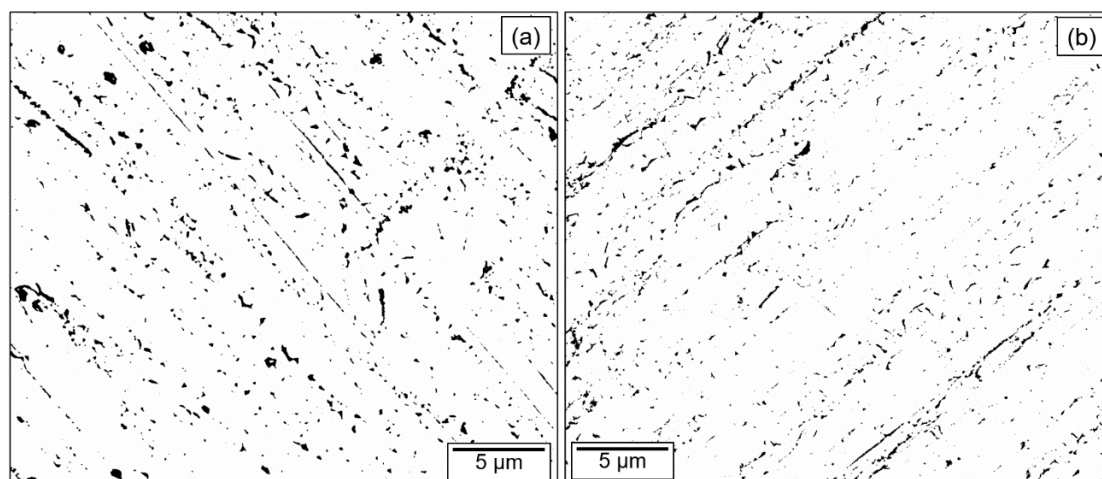
Figura 6: Imagens de MEV das amostras sinterizadas (a) 5 ciclos, (b) 10 ciclos.



As imagens de MEV após o tratamento são apresentadas na Figura 7. Assim como para as amostras não sinterizadas, o tratamento de imagem não foi capaz de

eliminar completamente os riscos na superfície da amostra, impactando parcialmente nas medições. A porosidade medida para as amostras sinterizadas com 5 ciclos e com 10 ciclos de MDF foi igual a 3,9% e 3,0%, respectivamente.

Figura 7: Área de poros medida para as amostras sinterizadas (a) 5 ciclos, (b) 10 ciclos. Fonte: própria.



Os resultados obtidos indicaram que o aumento do número de ciclos de MDF reduz a porosidade do material tanto para a condição não sinterizada quanto para a condição sinterizada. Tal fenômeno está em consonância com a literatura. Dois fenômenos que ocorrem durante a deformação severa de pós contribuem para a densificação do material. Em um primeiro momento, os pós se agrupam e se reorganizam de modo a reduzir o volume de vazios, que não são totalmente eliminados. Em um segundo momento, com o aumento da deformação plástica, as partículas se fragmentam e preenchem os vazios existentes, e os contornos entre os pós são eliminados [10]. Considerando esses fenômenos que ocorrem durante a compressão e os resultados obtidos, pode-se inferir que a cada ciclo de MDF, os pós de alumínio simultaneamente se fragmentavam e se reorganizavam espacialmente de modo a reduzir o seu volume, e consequentemente reduzir a porosidade do material. Assim, quanto maior o número de ciclos de compressão, maior a deformação total e a densificação dos pós e menor a porosidade dos corpos de prova.

Comparando os resultados obtidos para as amostras sinterizadas e não sinterizadas, observa-se que a diferença na porosidade para corpos de prova com 5 e com 10 ciclos é maior no material não sinterizado. Tal resultado se encontra em acordo com a literatura, que aponta para a convergência da densidade final para um

platô, mesmo para diferentes porosidades iniciais. Para temperaturas de sinterização inferiores a 585°C, é esperado que o tempo para a estabilização da densidade seja superior a 3h [13]. Assim, para as condições de sinterização deste estudo, ainda que os efeitos do número de ciclos de compactação na porosidade sejam minimizados pelo tratamento térmico, eles ainda estão presentes, uma vez que o platô de densidade não foi atingido.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, amostras de pó de alumínio comercialmente puro foram processadas por compactação com o uso de 5 e 10 ciclos de forjamento multidirecional (MDF), seguida ou não por sinterização a 550°C por 90 minutos. A porosidade das amostras foi medida por meio da análise de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) no software ImageJ. O resultado foi uma porosidade de 11,6% e de 5,3% no material não sinterizado para 5 e 10 ciclos de MDF respectivamente, e de 3,9% e 3,0% para o material sinterizado.

A partir das porosidades medidas, conclui-se que o aumento do número de ciclos de MDF reduz a porosidade do material tanto para a condição não sinterizada quanto para a condição sinterizada, para o número de ciclos avaliado. Uma possível explicação para essa densificação com o aumento da deformação aplicada é a ocorrência do agrupamento e do rearranjo espacial dos grãos dos pós e a fragmentação de partículas e a eliminação de contornos, decorrentes da deformação severa. Além disso, foi possível observar que a sinterização é capaz de homogeneizar o material e reduzir a porosidade, minimizando a influência do número de ciclos de compactação.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Ampara à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

REFERÊNCIAS

- [1] DAEHN, Katrin et al. Innovations to decarbonize materials industries. NATURE REVIEWS MATERIALS, v. 7, p. 275-294, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41578-021-00376-y>>.
- [2] DOKL, Monika et al. Maximizing the power output and net present value of organic Rankine cycle: Application to aluminium industry. ENERGY, v. 239, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122620>>.
- [3] BATISTA, L. A. Desenvolvimento de compósitos de nanotubos de carbono com matrizes metálicas de alumínio e a liga AA7050. Orientador: Eric Marchezini Mazzer. 2022. 132 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2022.
- [4] RASHID, M. W. A. et al. A Review: The Potential of Powder Metallurgy in Recycling Aluminum Chips (Al 6061 & Al 7075). In: CONFERENCE: 24TH DESIGN ENGINEERING SYSTEMS DIVISION JSME CONFERENCE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, [No.14-27]., 2014, Tokushima Japan. Conference Paper, 2014.
- [5] LIAW, L. L.; YUSUF, N. K. A Review on Aluminium Alloy Recycling Technique. RESEARCH PROGRESS IN MECHANICAL AND MANUFACTURING ENGINEERING, v. 3, n. 1, p. 175-183, 2022.
- [6] FARINA, A.; ANCTIL, A. Material consumption and environmental impact of wind turbines in the USA and globally. RESOURCES, CONSERVATION & RECYCLING, v.176, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105938>>.
- [7] SAEVARSDOTTIR, G. et al. Reducing the Carbon Footprint: Primary Production of Aluminum and Silicon with Changing Energy Systems. JOURNAL OF SUSTAINABLE METALLURGY, v. 7, p. 848-857, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40831-021-00429-0>>.
- [8] XIAO, Jian et al. Effects of the Space Holder Shape on the Pore Structure and Mechanical Properties of Porous Cu with a Wide Porosity Range. MATERIALS, v. 17, n. 3008, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma17123008>>.
- [9] TOMIĆ, Z. Numerical phase-field modelling and experimental validation of sintered steel fracture and fatigue behaviour. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, 2023. Disponível em: <<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:435888>>.

- [10] WANG, L. et al. Improving the formability and mechanical properties of TiAl alloy by direct forging of uncondensed powder. MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING A, v. 890, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145890>>.
- [11] ZEMTSOVA, E. G. et al. Mechanical properties of aluminium matrix composite reinforced with titanium carbide. JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES, v. 2817. 2024. Disponível em: <doi.org/10.1088/1742-6596/2817/1/012014>.
- [12] DA SILVA, N. A. N. et al. Multi-directional forging. COMPREHENSIVE MATERIALS PROCESSING. 2. ed. Elsevier Ltd., 2024. v. 3. p. 130–156. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-96020-5.00033-9>>.
- [13] ORTIZ, E. L. Efeito dos parâmetros de processo nas propriedades mecânicas e microestruturais da liga Al-6Cu-5Zn manufaturada via metalurgia do pó. Orientador: Giovana da Silva Padilha. 2020. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e de Manufatura) - Universidade Estadual de Campinas, Limeira, SP, 2020.

INFLUENCE OF MULTI-DIRECTIONAL FORGING ON THE POROSITY OF ALUMINIUM PROCESSED BY POWDER METALLURGY

ABSTRACT

One of the possible routes for aluminum recycling is processing through powder metallurgy (PM), which reduces pollutant emissions and increases efficiency of the process. This study proposes a variation of aluminum processing using PM, incorporating a severe plastic deformation (SPD) process, specifically multi-directional forging (MDF). After characterization, the powders were compacted using 5 and 10 MDF cycles with a strain amplitude of ~ 0.78 per cycle and an axial load of 412 MPa. Part of the material was sintered at 550°C for 90 minutes. The compacted materials, whether sintered or not, were analyzed using Scanning Electron Microscopy (SEM) and their porosity was measured with the aid of ImageJ software. The porosity results for 5 and 10 cycles were 11.6% and 5.3% for the non-sintered material and 3.9% and 3.0% for the sintered material.

Keywords: materials, congress, aluminum, powder metallurgy, multidirectional forging.