

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO VIA LASER DE CO₂ EM UMA CAMADA DE ALUMINETO DE FERRO Fe₂Al₅ OBTIDO PELO PROCESSO DE REVESTIMENTO POR FRICÇÃO

Vilella, B.¹; Contin, A.¹; Cunha, D.F. ²; Brito, P³; Troysi, F.D¹.

¹ Universidade Federal de Goiás (UFG) – Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT).

² Universidade Federal de Goiás (UFG) - Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC).

³Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas) – Programa de Pós-graduação em engenharia Mecânica.

*autor correspondente: Universidade Federal de Goiás (UFG) – Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), Estrada Municipal, qd, 04, Bairro Fazenda Santo Antônio, 74971-451, Aparecida de Goiânia - GO- Brasil. fernandatroyi@ufg.br

RESUMO

As ligas intermetálicas de Fe-Al, ou aluminetos de ferro, são reconhecidas pela resistência à corrosão e oxidação em altas temperaturas, sendo promissoras para aplicações em ambientes severos. Este estudo investigou o uso de diferentes densidades de energia de um LASER de CO₂ de 100W na transformação de fase e homogeneização da camada Fe₂Al₅ em aço carbono ABNT 1020, obtida por revestimento por fricção. A caracterização microestrutural foi realizada por microscopia óptica e eletrônica, identificando largura, espessura, porosidades e microdureza do revestimento. Foram testadas variações de velocidade e resolução do LASER, revelando que resoluções maiores e velocidades menores promoveram refusão superficial, enquanto 375 dpi resultou em maior homogeneização e menor porosidade. A variação da densidade de energia do LASER mostrou-se eficaz para modificar a microestrutura e formar fases Fe-Al rapidamente, no entanto é necessário a continuação dos testes afim de fazer uma análise mais detalhada e chegar em um parâmetro ótimo.

Palavras-chave: Revestimento por fricção, Alumineto de ferro, densificação, LASER.

INTRODUÇÃO

Os aluminetos de ferro (Fe-Al) são materiais intermetálicos que têm despertado grande interesse no setor industrial devido às suas propriedades notáveis, como baixa

densidade e alta resistência à corrosão e oxidação, especialmente em temperaturas superiores a 900 °C (1- 4). Essas características fazem dos aluminetos de ferro uma alternativa atraente aos aços inoxidáveis em diversas aplicações de engenharia [5-8]. Além disso, esses intermetálicos estão sendo investigados para utilização em componentes estruturais que operam em ambientes extremos, como trocadores de calor em usinas nucleares e solares, e em instalações que lidam com cloreto de potássio a altas temperaturas, encontradas principalmente em usinas de biomassa [9-12]. No entanto, a ampla aplicação dos intermetálicos Fe-Al tem sido limitada por sua fratura frágil e baixa ductilidade em temperaturas ambientes, o que dificulta o processamento a frio [13]. A técnica de revestimento por fricção tem se mostrado promissora para a obtenção de revestimentos com espessuras na ordem de centenas de microns o que garante uma maior resistência abrasiva. [14;15].

O revestimento por fricção é um processo em que uma haste metálica rotativa é pressionada contra o material a ser revestido, gerando atrito que eleva a temperatura e provoca a deformação plástica da haste. Esse movimento contínuo cria um recobrimento uniforme sobre a superfície do substrato. Os parâmetros principais que influenciam o processo incluem a força axial, a velocidade de rotação e a velocidade de avanço. Essa técnica tem sido aplicada para produzir revestimentos em diversos materiais, como aço inoxidável e ligas de alumínio sobre aço carbono, destacando-se pela formação de uma microestrutura de grãos finos e alta dureza [16;17].

Uma das principais vantagens do revestimento por fricção é a ausência de fusão e diluição dos materiais, o que resulta em revestimentos quimicamente homogêneos e localiza as transformações de fase próximas à interface. Isso confere aos revestimentos uma resistência superior ao desgaste e à corrosão em comparação com métodos convencionais. Dessa forma, o revestimento por fricção tem se mostrado uma técnica promissora para aplicações industriais que exigem alta durabilidade e proteção em ambientes agressivos [16].

Entretanto, independentemente do tipo de revestimento a formação de poros devido ao efeito Kirkendall, resultante das diferenças nas taxas de difusão entre Fe e Al, continua sendo um desafio para a melhoria das propriedades mecânicas dos materiais fabricados [15;18].

Nesse sentido uma alternativa para a diminuição da porosidade é através da densificação que se refere ao processo de redução de porosidade e aumento da densidade de um material, geralmente através da aplicação de pressão, calor ou

ambos. Esse conceito é particularmente importante na melhoria das propriedades mecânicas, como resistência, dureza e tenacidade, além de aumentar a integridade estrutural. Em revestimentos, a densificação é crucial porque minimiza a presença de defeitos internos, como poros ou microfissuras, que podem comprometer a performance do material, especialmente sob cargas mecânicas elevadas ou em ambientes agressivos. Quanto maior a densidade do material, mais uniformes e resistentes são as suas propriedades, o que contribui para a durabilidade e a confiabilidade dos revestimentos em aplicações industriais [19].

O emprego de uma fonte de calor oriunda de um feixe laser tem sido largamente empregada para processos de sinterização e densificação, devido as vantagens de: fonte de calor concentrada, aquecimento localizado e instantâneo, rápido processamento, baixo custo de produção [20], [21]. Vários trabalhos encontrados na literatura [21], [22], [23] utilizam do tratamento via laser para obtenção de melhorias de densificação. De um modo geral, a porosidade das superfícies diminuiu com o aumento da densidade de energia do laser [24].

Nesse sentido, o objetivo geral do Presente projeto de pesquisa é analisar a densificação da camada de alumineto de ferro Fe_2Al_5 após tratamento da superfície com a incidência de diversas intensidades de LASER de CO_2 .

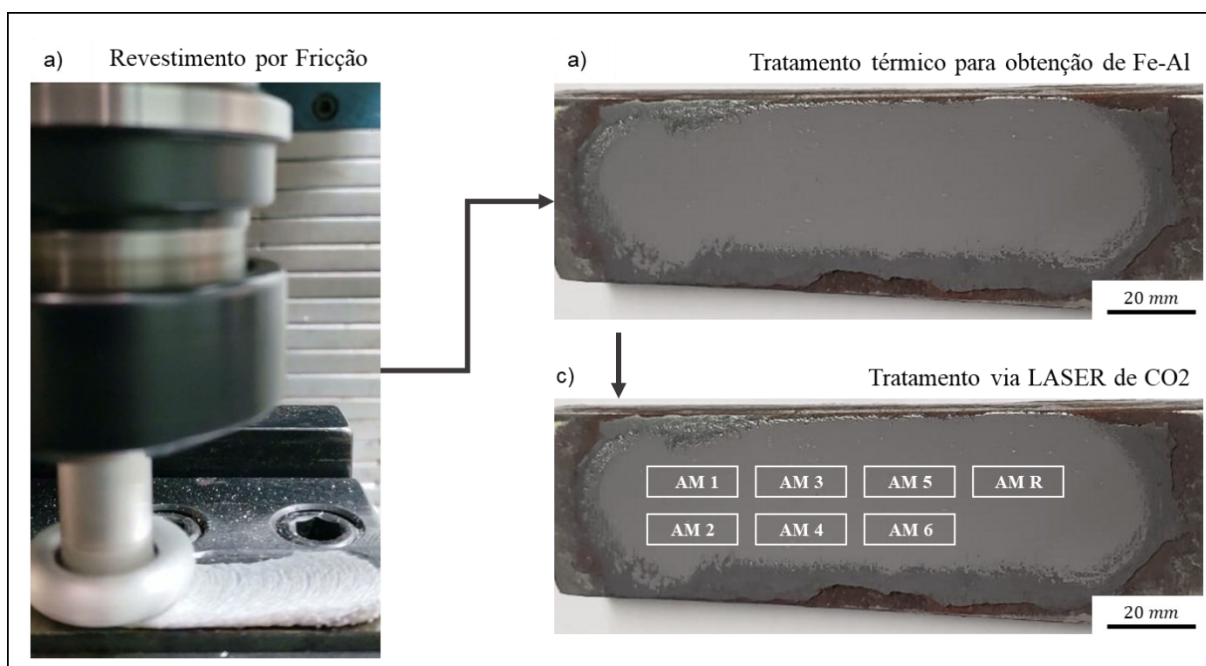
MATERIAIS E MÉTODOS

Obtenção das amostras

Os materiais selecionados para o estudo deste trabalho foram chapas de aço ABNT 1020, com dimensões de 200 x 100 x 8 mm (comprimento x largura x espessura), e hastes consumíveis de liga de Al 6351 (Al-1% Si-0,6% Mn-0,6% Mg), com dimensões de 100 x 15,4 mm (comprimento x diâmetro). Os parâmetros do processo de revestimento por fricção utilizados incluíram uma velocidade de rotação da haste consumível (Ω) de 3000 rpm, uma velocidade de avanço de 250 mm/s, e a razão entre os movimentos horizontal (V_x) e vertical (V_z). Para a deposição das hastes consumíveis, foi utilizado um centro de usinagem CNC, modelo ROMI Discover 560, com potência de 15/11 cv/kW e capacidade de rotação de até 10000 rpm, conforme descrito em trabalhos anteriores [25,26](Figura 1-a).

Baseando-se no trabalho [15], foi realizado um tratamento térmico de recozimento para a obtenção de alumineto de ferro (Fe_2Al_5). As amostras foram submetidas a aquecimento em um forno mufla digital, fabricado pela Hipperquímica, com controlador Novus N1030, durante um período de 72 horas a uma temperatura de 650 °C. Após esse período, o forno foi desligado, e as amostras foram retiradas somente após a estabilização da temperatura ambiente (Figura 1-b).

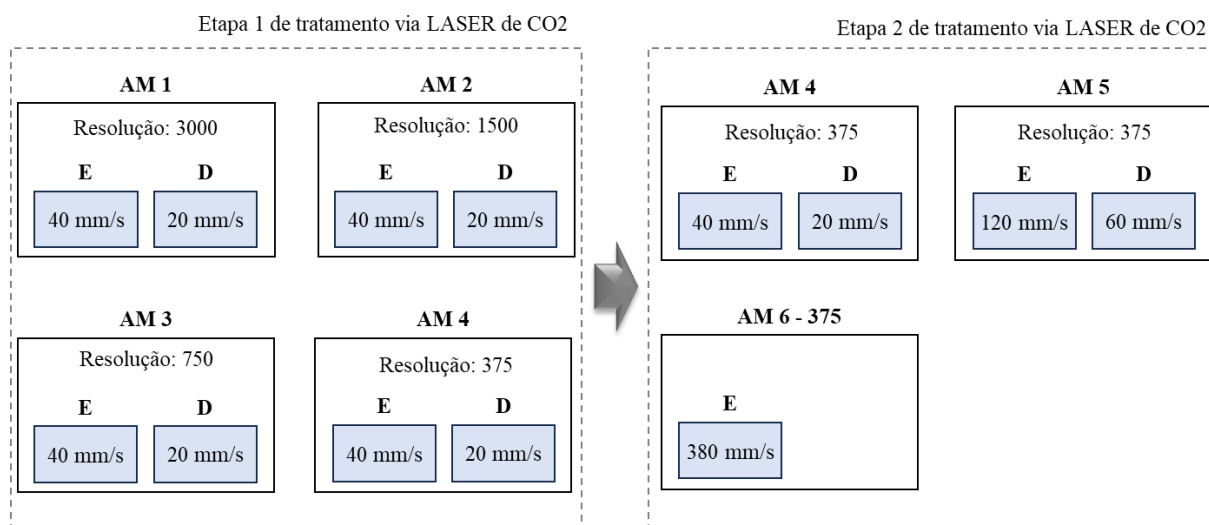
Figura 1 – Etapas dos testes. a) Revestimento por Fricção; b) Tratamento térmico para obtenção de Fe-Al; c) Tratamento via LASER de CO_2



Em seguida, as amostras foram submetidas a diferentes intensidades de LASER de CO_2 (Figura 1-c). Para a realização do tratamento via LASER de CO_2 , foi utilizada uma máquina pertencente ao Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF-UFG). A máquina operou com uma potência de saída de 100 W, diâmetro de feixe de 300 μm e um comprimento de onda de 10,6 μm . Os principais parâmetros de irradiação do laser utilizados no experimento foram a resolução (número de pontos por polegada) e a velocidade de varredura do feixe.

Na etapa 1 de tratamento via LASER, foram selecionadas resoluções de 3000, 1500, 750 e 375 dpi, variando a velocidade de varredura em 40 e 20 mm/s. Com base na análise de desempenho, realizada por microscopia, a resolução com melhor resultado foi escolhida, mantendo-se esta constante enquanto se variava apenas a velocidade de varredura, executando assim a etapa 2 de tratamento conforme exemplificado na Figura 2.

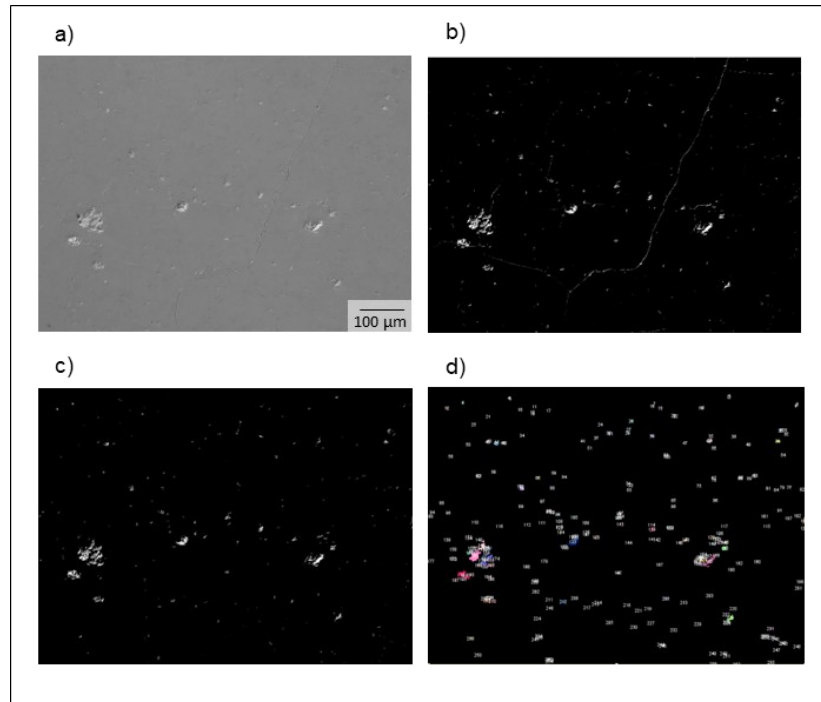
Figura 2 - Etapas de tratamento superficial via LASER de CO₂



A análise da microestrutura do topo dos revestimentos foi realizada por meio de Microscopia Ótica (MO), visando identificar defeitos como poros e trincas. Em seguida, as amostras selecionadas foram examinadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

As imagens obtidas por MEV (Figura 3-a) foram processadas utilizando o software ImageJ, que permitiu o ajuste de contraste, a conversão de imagens em escala de cinza (conversão de RGB para 8 bits), a segmentação por limiar e a conversão automática em imagens binárias [27-28] (Figura 3-b). Na sequência foi realizado um tratamento de verificação das porosidades e adequação (Figura 3-c). Para determinar a porosidade total, foi empregado o índice quantitativo que é comumente empregado para porosidade plana (Figura 3-d). Os procedimentos de tratamento de imagem seguiram as metodologias descritas por [29-30].

Figura 3 - Tratamento de imagem via *Software Image J*



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma relação entre a quantidade de porosidade nas amostras é mostrada no Gráfico 1. Na etapa 1 (Figura 2-a) foi observado uma redução de aproximadamente 92% na quantidade de poros das amostras AM4D e AM4E quando comparada com a amostra referência. Deste modo, estas amostras foram elencadas para a etapa 2 (Figura 2-b), em que foi observado um decréscimo de aproximadamente 98% de porosidade na amostra AM6. O que fica ainda mais evidente analisando as imagens de microscopia eletrônica de varredura (Figura 4)

Gráfico 1 - Quantidade de poros x amostras. a) Amostras Etapa 1; b) Amostras Etapa 2

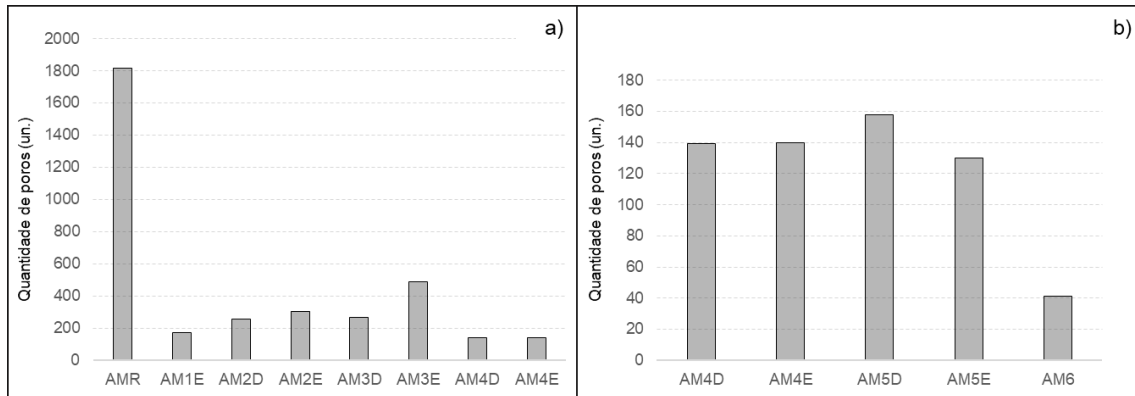
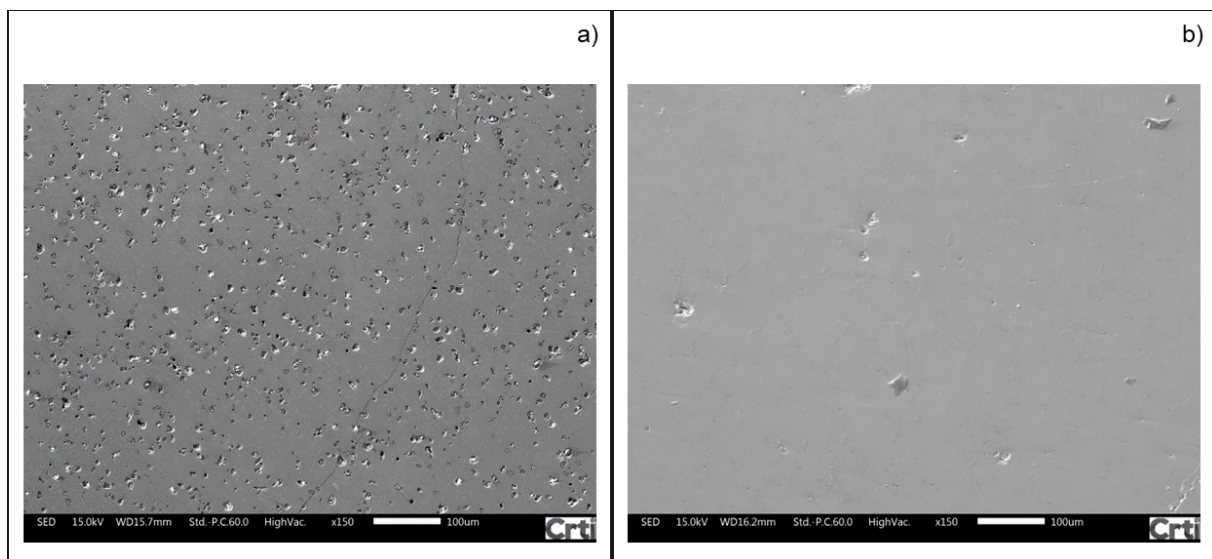


Figura 4 - Comparação da Microscopia Eletrônica de Varredura das Amostras a) AMR; b) AM6

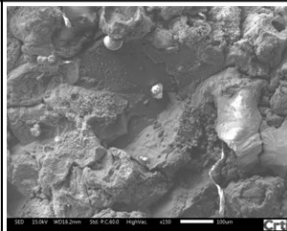
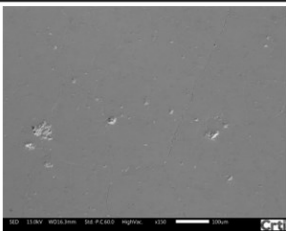
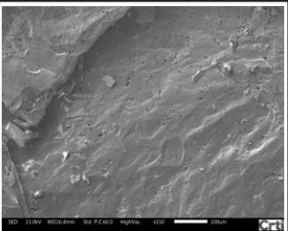
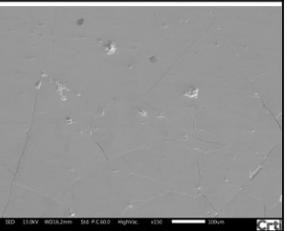
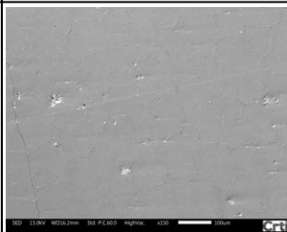
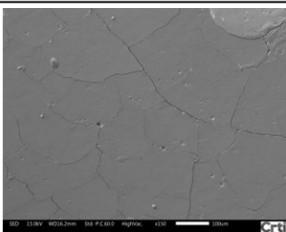
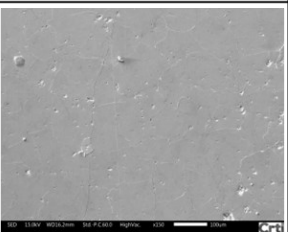
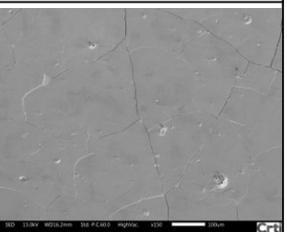


O efeito da influência da densidade de energia em diferentes resoluções na formação de porosidade foi investigado e gerado uma carta do processo. As vistas de topo obtidas a partir de MEV, com uma ampliação de 150x são apresentadas na Figura 5. Observa-se uma alteração significativa em relação aos poros em comparação com a Figura 4-a. Nota-se, que para a condição de elevada densidade de energia e resolução, ocorreu o processo de refusão superficial que não é ideal devido a possibilidade de dissolução das fases formadas. Um indicativo desse processo é evidenciado pelo formato de gota (círculo branco) em duas regiões na superfície da amostra AM1D. Na carta fica ainda evidente que a diminuição da resolução e a densidade de energia constante ($E = 21,23$ ou $42,46 \text{ J/mm}^2$), levou aos melhores resultados em termos de isenção de refusão superficial e diminuição dos poros, vistos

principalmente pelas amostras AM4E e AM4D. Com a diminuição da resolução, a sobreposição do feixe diminuiu, contribuindo apenas para o processo de densificação.

Outro fato interessante é que o aumento da velocidade de varredura, ou seja, menor densidade de energia, causou o aumento de trincas superficiais, como nos casos comparativos dos conjuntos de AM2D-AM2E e AM4D-AM4E. À medida que a densidade de energia diminui, menor é volume superficial aquecido e com isso, maior a taxa de resfriamento, que pode ocasionar trincas superficiais. O caso inverso é visto para elevada densidade de energia [24].

Figura 5 - Carta do processo comparando densidade de Energia (E) x Resolução

	3000 dpi	1500 dpi	750 dpi	375 dpi
E = 42,46 J/mm ²				
	AM1D	AM2D	AM3D	AM4D
E = 21,23 J/mm ²				
	AM1E	AM2E	AM3E	AM4E

Analisando as influências da densidade de energia e resolução para a melhor condição da Etapa 1, observa-se que a amostra AM4D apresentou os melhores resultados em termos de menores quantidade de poros e trincas superficiais.

Para a etapa 2, foi mantida a resolução da amostra AM4D, no entanto, as velocidades de varredura foram incrementadas e consequentemente a densidade de energia diminuída. Nota-se ainda o aparecimento de trincas superficiais, exceto na condição da amostra AM6, na menor densidade de energia. Isto pode ser explicado pelo fato de que na densidade de energia de $E = 2,23 \text{ J/mm}^2$, a absorção superficial, oriunda do feixe do laser, foi mínima, no entanto, capaz de sinterizar os grãos de maneira mais compacta, contribuindo assim para uma diminuição dos poros e ainda de inibir a formação de trincas superficiais durante o resfriamento. Já nos casos de materiais cerâmicos, como no caso da alumina, os regimes de processamento a laser

que causam a fusão da superfície são desejáveis para a densificação, ou seja, o uso de densidades de energia elevadas [24].

CONCLUSÕES

Este estudo analisou a densificação da camada de alumineto de ferro Fe_2Al_5 após tratamento com diferentes intensidades de LASER de CO_2 . Na primeira etapa, observou-se uma redução significativa na porosidade das amostras, com destaque para AM4D e AM4E, que apresentaram uma diminuição de até 92% em relação à amostra de referência. Na segunda etapa, a amostra AM6 mostrou uma redução de porosidade de 98%, evidenciada por imagens de microscopia eletrônica. A carta do processo revelou que menores resoluções e densidade de energia constante resultaram na melhor densificação, com isenção de refusão superficial. No entanto, o aumento da velocidade de varredura levou ao surgimento de trincas superficiais devido ao rápido resfriamento. Na etapa 2, a amostra AM6, com menor densidade de energia, apresentou a melhor combinação de densificação e resistência a trincas.

CONCLUSÕES

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq (Processo: 405623/2023-2) e à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG).

REFERÊNCIAS

- [1] HOTAŘ, Adam *et al.* High-temperature oxidation behaviour of Zr alloyed Fe_3Al -type iron aluminide. *Corrosion science*, v. 63, p. 71-81, 2012.
- [2] BRITO, Pedro *et al.* Electrochemical corrosion behaviour of (100),(110) and (111) Fe_3Al single crystals in sulphuric acid. *Corrosion Science*, v. 126, p. 366-373, 2017.
- [3] LIU, Yanan *et al.* Fabrication and Characterization of Highly Porous FeAl-Based Intermetallics by Thermal Explosion Reaction. *Advanced Engineering Materials*, v. 21, n. 4, p. 1801110, 2019.
- [4] LIU, YaHui *et al.* Mechanical properties and electronic structures of Fe-Al intermetallic. *Physica B: Condensed Matter*, v. 506, p. 1-11, 2017.
- [5] JOSLIN, D. L. *et al.* Reaction synthesis of FeAl alloys. *Materials Science and Engineering: A*, v. 192, p. 544-548, 1995.
- [6] HOSODA, Hideki *et al.* Cold rolling of B2 intermetallics. *Journal of alloys and compounds*, v. 302, n. 1-2, p. 266-273, 2000.

- [7] SIKKA, V. K. et al. Melting and casting of FeAl-based cast alloy. *Materials Science and Engineering: A*, v. 258, n. 1-2, p. 229-235, 1998.
- [8] CHEN, Ding et al. Preparation of the Al–Cu–Fe & Al–Fe–Si ternary intermetallic powders via a novel reaction ball milling technique. *Journal of alloys and compounds*, v. 376, n. 1-2, p. 89-94, 2004.
- [9] FETZER, Renate et al. Oxide scale formation of modified FeCrAl coatings exposed to liquid lead. *Corrosion science*, v. 55, p. 213-218, 2012.
- [10] CIONE, C. et al. Oxide scale formation on 316L and FeCrAl steels exposed to oxygen controlled static LBE at temperatures up to 800° C. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 144, p. 235-246, 2016.
- [11] PAN, T. J. et al. Internal oxidation and phase transformations of multi-phase Fe–Ni–Al and Fe–Ni–Al–Cr alloys induced by KCl corrosion. *Corrosion science*, v. 53, n. 6, p. 2115-2121, 2011.
- [12] LI, Y. S.; SPIEGEL, M. Internal oxidation of Fe–Al alloys in a KCl-air atmosphere at 650 C. *Oxidation of metals*, v. 61, p. 303-322, 2004.
- [13] GAO, Haiyan et al. Porous FeAl intermetallics fabricated by elemental powder reactive synthesis. *Intermetallics*, v. 17, n. 12, p. 1041-1046, 2009.
- [14] SILVA, A. P. et al. Dynamic recrystallization in severely plastically deformed iron aluminide coatings obtained by friction surfacing. *Manufacturing Letters*, v. 33, p. 15-18, 2022.
- [15] TROYSE, Fernanda et al. Investigation of austenitic stainless steel coatings on mild steel produced by friction surfacing using a conventional CNC machining center. *Materials Research*, v. 22, p. e20180301, 2019.
- [16] GANDRA, João et al. Friction surfacing—A review. *Journal of materials processing technology*, v. 214, n. 5, p. 1062-1093, 2014.
- [17] BOCK, Frederic E. et al. Data-driven and physics-based modelling of process behaviour and deposit geometry for friction surfacing. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, v. 418, p. 116453, 2024.
- [18] UENISHI, Keisuke et al. Laser cladding of Fe-Cu based alloys on aluminum. *Solid State Phenomena*, v. 127, p. 331-336, 2007.
- [19] SALAMON, Marcel; MEHRER, Helmut. Interdiffusion, Kirkendall effect, and Al self-diffusion in iron–aluminium alloys. *International Journal of Materials Research*, v. 96, n. 1, p. 4-16, 2021.
- [20] CHENG, J.; KAR, A. Mathematical model for laser densification of ceramic coating. *Journal of materials science*, v. 32, n. 23, p. 6269-6278, 1997.
- [21] MACEDO, Z. S.; HERNANDES, A. C. Sinterização ultra-rápida de materiais cerâmicos usando radiação laser (Ultra-fast laser sintering of ceramic materials). *Cerâmica*, v. 46, n. 300, p. 196, 2000.
- [22] BACCIOCHINI, Antoine; GLANDUT, Nicolas; LEFORT, Pierre. Surface densification of porous ZrC by a laser process. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 29, n. 8, p. 1507-1511, 2009.
- [23] TRIANTAFYLIDIS, D.; LI, L.; STOTT, F. H. Crack-free densification of ceramics by laser surface treatment. *Surface and Coatings Technology*, v. 201, n. 6, p. 3163-3173, 2006.
- [24] HARIMKAR, S.; DAHOTRE, N. B. Laser assisted densification of surface porosity in structural alumina ceramic. *physica status solidi (a)*, v. 204, n. 4, p. 1105-1113, 2007.
- [25] DA SILVA, Márcio Maciel et al. Application of the friction surfacing process in a CNC machining center: a viability assessment for producing Al-alloy coatings on low carbon steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 40, p. 1-11, 2018.

- [26] TROYSI, F. Análise do processo de revestimento por fricção de aço inoxidável austenítico sobre aço carbono em centro de usinagem com comando numérico. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais Belo Horizonte, 2016.
- [27] COLLINS, Tony J. ImageJ for microscopy. *Biotechniques*, v. 43, n. S1, p. S25-S30, 2007.
- [28] ABRÀMOFF, Michael D.; MAGALHÃES, Paulo J.; RAM, Sunanda J. Image processing with ImageJ. *Biophotonics international*, v. 11, n. 7, p. 36-42, 2004.
- [29] WITS, Wessel W. et al. Porosity testing methods for the quality assessment of selective laser melted parts. *CIRP annals*, v. 65, n. 1, p. 201-204, 2016.
- [30] KASPEROVICH, Galina et al. Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting. *Materials & Design*, v. 105, p. 160-170, 2016.

INFLUENCE OF CO₂ LASER TREATMENT ON A Fe₂Al₅ IRON ALUMINIDE LAYER OBTAINED BY FRICTION COATING PROCESS

ABSTRACT

Fe-Al intermetallic alloys, or iron aluminides, are recognized for their resistance to corrosion and oxidation at high temperatures, making them promising for applications in severe environments. This study investigated the use of different energy densities of a 100W CO₂ LASER for phase transformation and homogenization of the Fe₂Al₅ layer on ABNT 1020 carbon steel, obtained through friction coating. Microstructural characterization was performed using optical and electron microscopy, identifying the width, thickness, porosity, and microhardness of the coating. Variations in LASER speed and resolution were tested, revealing that higher resolutions and lower speeds promoted surface remelting, while 375 dpi resulted in better homogenization and reduced porosity. The variation in LASER energy density proved effective in modifying the microstructure and rapidly forming Fe-Al phases; however, further testing is required for a more detailed analysis to determine optimal parameters.

Keywords: Friction coating, Iron aluminide, Densification, LASER.