

OBTENÇÃO DE ALUMINETO DE FERRO EM SUBSTRATO DE AÇO-CARBONO ATRAVÉS DE REVESTIMENTO POR FRICÇÃO SEGUIDO DE TRATAMENTO TÉRMICO

Fernanda Christina Teotonio Dias Troysi, fernandadias.eng@outlook.com¹

Bruna de Castro Del Rio Santos, brunadelriosantos@hotmail.com¹

Igor Marques Alves, igor.marques.alves@hotmail.com¹

Joanna Eichstaedt, asiaeichstaedt@op.pl²

Pedro Paiva Brito, ppbrito@gmail.com¹

¹Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico, CEP 30535-901, Belo Horizonte (MG).

²Gdansk University of Technology, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdansk, Poland.

Resumo: No presente trabalho foi investigada a camada de aluminetos de ferro obtida após tratamento térmico de recozimento realizado em depósito de liga de Al sobre substrato de aço-carbono, obtido pelo processo de revestimento por fricção. O processo de revestimento por fricção pode ser considerado um processo de soldagem no estado sólido utilizado para recobrir ou reparar superfícies de materiais similares ou dissimilares. Os procedimentos de deposição foram realizados em um centro de usinagem com Comando Numérico Computadorizado (CNC), o que apresenta o potencial para diminuição dos custos e simplificação do processo quando comparado com revestimentos por fricção realizados em máquinas especializadas, que ainda apresentam inserção limitada na indústria em comparação com equipamentos CNC convencionais, revestimentos por aluminização, revestimento à laser e revestimento por aspersão térmica. Foram utilizadas, como substrato, chapas de aço ao carbono ABNT 1020, com 200 x 100 x 8 mm e hastes consumíveis de alumínio com 100 mm de comprimento e 15,4 mm de diâmetro. Após a deposição as amostras foram submetidas a tratamento térmico de recozimento isotérmico a 650°C por 72 e 120 h. Após o tratamento, a seção transversal das amostras foi avaliada por meio Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e microdureza. Os revestimentos obtidos apresentaram espessura de aproximadamente 1,5 mm com composição química e dureza homogênea. Os valores de dureza obtidos foram elevados, entre 900 e 1000 HV, correspondentes à fase Fe₂Al₅.

Palavras-chave: Revestimento por fricção, alumineto de ferro, microestrutura, intermetálico.

1. INTRODUÇÃO

Aluminetos de Fe são ligas intermetálicas com potencial para utilização em temperaturas elevadas devido ao seu baixo custo, boa razão resistência/densidade e excelente resistência à oxidação e corrosão. Com efeito, materiais baseados no sistema Fe-Al (ou seus recobrimentos) são estudados para aplicações em reatores nucleares de água super-crítica (SUN *et al.*, 2009), ambientes contendo metal líquido como os fluidos de troca de calor encontrados em instalações de energia nuclear ou energia solar concentrada (FETZER *et al.*, 2012 e CIONEIA *et al.*, 2016), ambientes contendo KCl a alta temperatura, encontrados em plantas de biomassa (LI, 2004 e PAN *et al.*, 2011), entre outros.

A resistência à corrosão e à oxidação de aluminetos de Fe depende da formação de uma camada passiva de α -Al₂O₃ sobre a superfície da liga que a protege de ambientes corrosivos. Por essa razão, vários estudos têm sido realizados com o objetivo de estudar os mecanismos de passivação de aluminetos de Fe em temperaturas elevadas (PÖTER *et al.*, 2005 e BRITO *et al.*, 2016). Destaca-se ainda o potencial para redução de peso das estruturas, já que essas ligas contêm elevado teor de alumínio (podendo superar 25% em peso), além da possibilidade de serem fundidas a partir de sucata de aço e alumínio (BORGES, *et al.*, 2014). Apesar disso, o elevado teor de Al dessas ligas reduz a sua ductilidade, dificultando o seu processamento por conformação mecânica e reduzindo a disponibilidade das ligas na forma de chapas ou barras. Por essa razão, nas últimas duas décadas buscou-se desenvolver revestimentos de aluminetos de Fe que pudessem ser aplicados em aços-carbono ou aços inoxidáveis com o objetivo de elevar a resistência à corrosão ou oxidação em temperaturas elevadas.

A maior parte dos trabalhos buscou empregar técnicas de revestimento baseadas em aspersão térmica (CINCA, 2012) e aluminização seguida de recozimento para difusão de Al/Fe. (KOBAYASHI E YAKOU 2002). De modo geral, observa-se que, apesar de resultados positivos, os revestimentos formados no caso dos processos de aspersão térmica são

altamente sensíveis aos parâmetros de deposição, sendo frequente a ocorrência de poros (HAŠILD *et al.*, 2012 e PORCAYO-CALDERON *et al.*, 2013) e heterogeneidades de composição química ao longo da camada depositada, levando à redução da resistência à corrosão, oxidação e desgaste. No caso de revestimentos obtidos por aluminização seguida de recozimento, observa-se a espessura reduzida das camadas obtidas, frequentemente inferior a 0,1 mm (CANARIM *et al.*, 2014).

Uma possível alternativa aos processos de recobrimento baseados em aspersão térmica e aluminização é o processo de Revestimento por Fricção (RF, do inglês *Friction Surfacing*), que permite a união de materiais similares ou dissimilares no estado sólido evitando, assim, alguns dos problemas associados à solidificação como a formação de poros, trincas, tensões residuais, diluição, entre outros. O processo foi desenvolvido efetivamente a partir do início da década de 1990 e tem despertado crescente interesse da comunidade científica desde então, especialmente em virtude da crescente demanda por recobrimentos de elevado desempenho para aplicações consideradas críticas (GANDRA *et al.*, 2014). No processo de revestimento por fricção, uma haste metálica consumível em movimento de rotação é pressionada sobre o material a ser revestido – normalmente um produto plano, embora o processo possa também ser aplicado sobre superfícies curvas. O atrito entre as superfícies provoca um aumento de temperatura após o contato inicial, o que promove a deformação plástica dos metais envolvidos. Estabelece-se, então, um movimento relativo de translação entre o substrato e a haste com a formação de um depósito em forma de cordão (GANDRA *et al.*, 2014). O processo é ilustrado na Fig. 1. Os principais parâmetros operacionais são a força axial (F), a velocidade de rotação (Ω) e a velocidade de avanço (v), conforme ilustrado na Figura 1.

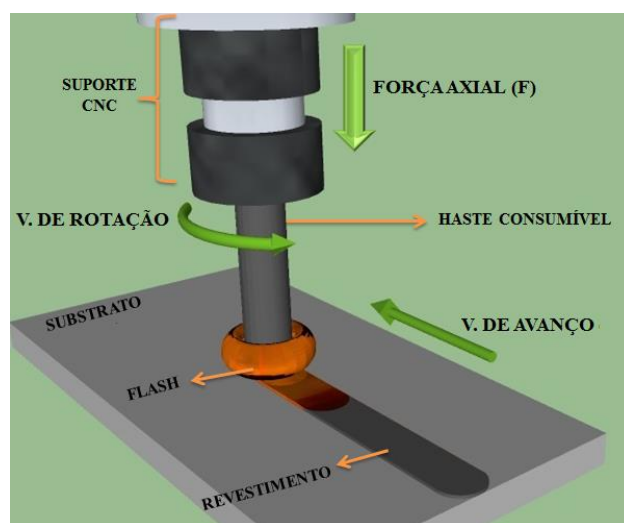


Figura 1 - Ilustração esquemática do processo RF com a identificação dos principais parâmetros do processo. Fonte: TROYSI *et al.*, 2016

2. MATERIAL E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Os materiais selecionados para estudo do presente trabalho foram chapas de aço ABNT 1020 com dimensões (comprimento x largura x espessura) 200 x 100 x 8 mm e hastes consumíveis de liga de Al 6351 (Al-1% Si-0,6% Mn-0,6% Mg) com dimensões (comprimento x diâmetro) 100 x 15,4 mm. As chapas utilizadas como substrato foram recebidas na condição laminada a quente e os recobrimentos foram aplicados ao longo da direção de laminação das chapas. Para remoção da carepa de laminação antes da aplicação do revestimento as superfícies foram limpas com escova de aço.

2.2 Parâmetros de deposição por fricção

Os parâmetros de processo avaliados neste trabalho foram: velocidade de rotação da haste consumível (Ω), velocidade de avanço da haste consumível e razão entre os movimentos V_x e vertical, V_z . A razão $V_x:V_z$ foi adotada como parâmetro face à impossibilidade prática, no equipamento utilizado, de se aplicar uma força axial pré-determinada, como ocorre convencionalmente no processo RF efetuado em equipamentos especializados. Os valores dos parâmetros adotados inicialmente e a rugosidade inicial das chapas foram:

- Velocidade de rotação da haste consumível (Ω): 3000 rev/min.
- Velocidade de avanço da haste consumível (V_x): 250 mm/s.
- Rugosidade superficial: 2,95 μm (escova de aço).

2.3 Deposição das hastes consumíveis

Para a deposição das hastes consumíveis foi utilizado um Centro de Usinagem com comando numérico, ROMI Discover 560 com potência 15/11 cv/kW e velocidade de rotação de até 10000 rpm, conforme realizado em trabalhos anteriores (TROYSE *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2018).. O ciclo de deposição é controlado através de um software, onde são programados os parâmetros de deposição desejados dentro das limitações do equipamento.

2.4 Tratamento térmico

Para a realização do tratamento térmico de recozimento, as amostras foram seccionadas nas dimensões (comprimento x largura) 15 x 30 mm e submetidas ao aquecimento em um forno mufla digital da fabricante *Hipperquímica*, controlador *Novus N1030*, durante o período de 72 horas (amostra 1) e 120 horas (amostra 2) a uma temperatura de 650 °C. Após esse período o forno foi desligado e as amostras foram retiradas após a estabilização do forno à temperatura ambiente.

2.5 Microdureza

As amostras foram testadas em um microdurômetro *HMV Micro Vickers Hardness*, da fabricante *Shimadzu*. Nas amostras foi aplicada uma carga pré-estabelecida de 490,3 mN (0,05 HV) durante 20 segundos ao longo da seção transversal do revestimento, com o penetrador de diamante Vickers.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise dos revestimentos

Definidos os limites para os valores dos parâmetros de processo, foram realizados testes nas condições expostas nos tópicos 2.2 e 2.4 deste trabalho. Na Figura 2 são apresentadas fotografias de vista superior do revestimento anterior ao tratamento térmico, em que se pode notar a formação de um depósito regular ao longo de todo seu comprimento. Observa-se que na vista superior apresentado na Figura 2 o sentido de deposição foi da direita para a esquerda.



Figura 2 – Vista superior do revestimento antes do tratamento térmico.

Os aspectos da seção transversal de revestimentos antes e depois do recozimento (Amostra 2) são apresentados, respectivamente nas Figuras 3(a) e 3(b). Pode-se notar alteração significativa da morfologia da interface após o tratamento de recozimento, com a presença de protuberâncias em direção ao substrato, formações típicas de fases intermetálicas do sistema Fe-Al (KOBAYASHI e YAKOU, 2002). Análise semi-quantitativa da composição ao longo da camada depositada por espectroscopia de energia dispersiva no MEV revelou homogeneidade da composição química em toda a camada depositada: cerca de 1,6 mm, como mostrado na Figura 3(b).

É válido destacar a espessura obtida para a camada intermetálica no presente trabalho (superior a 1,5 mm). As camadas intermetálicas de Fe-Al têm sido obtidas por aluminização (imersão da peça a ser revestida em banho de Al líquido) (KOBAYASHI e YAKOU, 2002), por cementação em caixa (mas utilizando Al ao invés de carbono) e, mais recentemente, por fusão de Al na superfície utilizando laser (SHARMA *et al.*, 2010). Essas técnicas funcionam, mas não apresentam a possibilidade de obtenção de camadas de espessura elevada (em geral, menor que 0,5 mm, sendo frequentes camadas com 0,1 a 0,2 mm). Em aplicações que requerem resistência ao desgaste ou à corrosão a espessura reduzida pode significar menor vida útil dos revestimentos de forma que a elevação da espessura da camada intermetálica pode ser considerada um ganho do processo de revestimento por fricção seguido do tratamento de difusão.

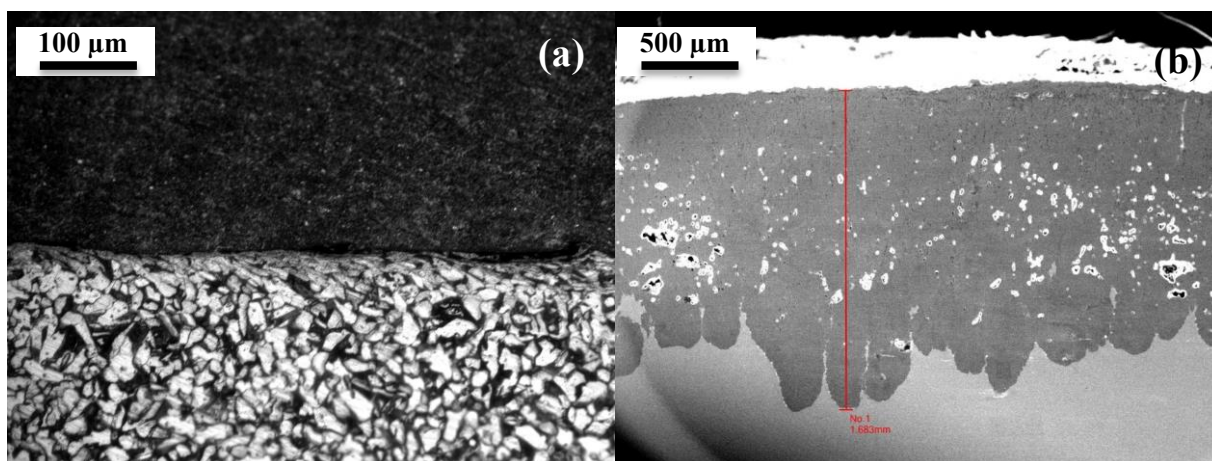


Figura 3 – Análise da seção transversal de revestimentos obtidos da amostra 2 (a) antes do recozimento (microscopia ótica, ataque Nital 2%) e (b) após o tratamento de recozimento (MEV, sem ataque).

3.2 Análise da Microdureza

Na Figura 4 é apresentada a distribuição de microdureza para as amostras 1 e 2 respectivamente. Os elevados valores de dureza obtidos contrastam com os observados no revestimento antes do tratamento de recozimento, situados em aproximadamente 80 HV.

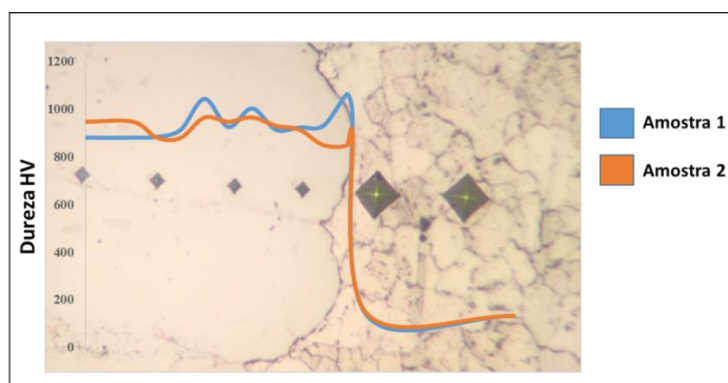


Figura 4 – Microdureza da seção transversal da amostra 1 e 2.
Fonte: Dados da Pesquisa.

A distribuição de dureza na seção transversal do revestimento se manteve constante com valores em torno de 930 HV, sendo comparáveis as citadas por Kobayashi (2002) para intermetálicos Al-Fe, $\rightarrow$ Fe_2Al_5 .

Os perfis de composição de Al e Fe apresentados na Figura 5 merecem destaque. Como esperado, os teores de ambos os elementos no revestimento aparecem de forma homogênea, o que comprova os valores obtidos através do teste de microdureza. A análise semi-quantitativa de composição química realizada por MEV-EDS indicou frações relativas em peso de 53,2%Al, 51,9%Al, 51,5%Al e 51,7%Al em posições localizadas, respectivamente, na superfície da camada, posições intermediárias (dois terços e um terço da espessura) e próximo à interface.

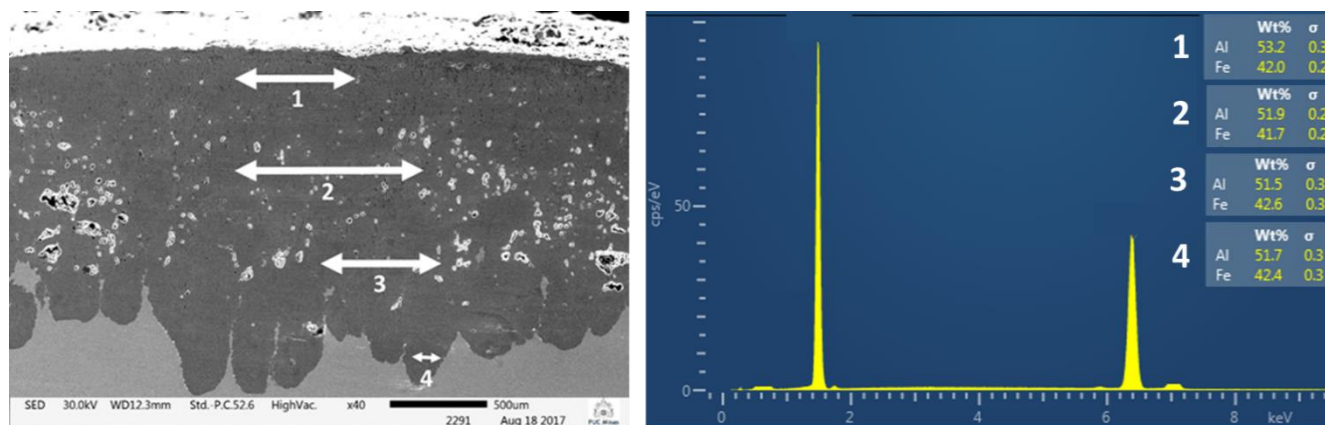


Figura 5 – Varredura EDS realizada no revestimento da amostra 2.

4. CONCLUSÃO

Após adquirir camada homogênea por meio de revestimento por fricção, no processo de difusão ocorrido no revestimento em virtude do tratamento térmico, obteve uma camada espessa quando comparado com demais processos de obtenção deste intermetálico. Através da análise de microdureza e foi possível detectar a formação única de camada intermetálica Fe_2Al_5 que foi confirmada pelo teste de varredura EDS que mostra por meio quantitativo homogeneidade de composição no revestimento.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a I. B. dos Santos e K. H. Silva pelo auxílio na realização dos experimentos de Revestimento por fricção, e apoio financeiro da FAPEMIG, PUC Minas (Projeto FIP 2016/11151-S2) e CNPq projeto nº 409139/2016-5). F. C. T. D. Troysi teve apoio da CAPES (bolsa de estudos de doutorado) e P. Brito teve apoio CNPq (bolsa Produtividade em Pesquisa 306269/2016-3).

6. REFERÊNCIAS

- Borges, D. F. L. et al., Making iron aluminides from scrap, *Journal of Material Research and Technology* 3 p. 101-106, 2014.
- Brito, P. et al., The crystallographic template effect assisting the formation of stable $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, *Corrosion Science* 105 p.100-108, 2016.
- Canarim, R. C., et al., Síntese in-situ de aluminetos de ferro (Fe-Al) na aspersão térmica a chama, por meio de uma mistura de pós elementares Fe-Al. In: VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM 2014.
- Cinca, N., Guilemany, J. M., Thermal spraying of transition aluminides: An overview, *Intermetallics* 24 p. 60-72, 2012
- Cionea, C., et al., Oxide scale formation on 316L and FeCrAl steels exposed to oxygen controlled static LBE at temperatures up to 800 °C, *Sol. Energy Materials & Solar Cells* 144, p.235-246, 2016.
- Fetzer, R., A. Weisenburger, A. Jianu, G. Müller, Oxide scale formation of modified FeCrAl coatings exposed to liquid lead, *Corrosion Science* 55, p.213-218, 2012.
- Gandra, J. et al., Friction Surfacing – A Review. *Journal of Materials Processing Technology*, 214, p.1062-1093, 2014.
- Hašild, P. et al., High temperature oxidation of spark plasma sintered and thermally sprayed FeAl-based iron aluminides, *Acta Physica Polonica A* 122 p. 465-468, 2012.
- Li, Y. S., Spiegel, M., Internal oxidation of Fe-Al alloys in a KCl-air atmosphere at 650 °C, *Oxidation of Metals* 61 p. 303-322, 2004.
- 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* 53 p. 2115-2121, 2011.
- Porcayo-Calderon, J., et al., Corrosion performance of Fe-Al intermetallic coatings in 1.0M NaOH solution, *International Journal of Electrochemical Science* 8, p. 12205-12218, 2013.
- Pöter, B., et al., Early stages of protective oxide layer growth on binary iron aluminides. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, v. 219, p. 1489-1503, 2005.
- Sharma, G., et al, A facile route to produce FeAl intermetallic coatings by laser surface alloying - *Intermetallics* 18 (2010) 2124e2127.
- Silva, M., 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. 14-25, 2018.

- Sun C. et al., Progress in corrosion resistant materials for supercritical water reactors, Corrosion Science 51, p. 2508-2523, 2009.
- S. Kobayashi, T. Yakou / Materials Science and Engineering A338, 44-53, 2002.
- Troysi, F. C. T. D. *et al*, Análise do processo de Revestimrnto por fricção de aço inoxidável austenítico sobre aço carbono em centro de usinagem com comando numérico. CONEM, 2016.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

OBTAINING IRON ALUMINET IN STEEL-CARBON SUBSTRATE THROUGH FRICTION COATING FOLLOWED THERMAL TREATMENT

Fernanda Christina Teotonio Dias Troysi, fernandadias.eng@outlook.com¹

Bruna de Castro Del Rio Santos, brunadelriosantos@hotmail.com¹

Igor Marques Alves, igor.marques.alves@hotmail.com¹

Joanna Eichstaedt, asiaeichstaedt@op.pl²

Pedro Paiva Brito, ppbrito@gmail.com¹

¹Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico, CEP 30535-901, Belo Horizonte (MG).

²Gdansk University of Technology, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdansk, Poland.

Abstract. In the present work, the iron aluminides layer obtained after annealing heat treatment in Al alloy deposit on carbon steel substrate obtained by the friction coating process was investigated. The friction coating process can be considered a solid state welding process used to cover or repair surfaces of similar or dissimilar materials. The deposition procedures were performed in a computerized numerical control (CNC) machining center, which has the potential to reduce costs and simplify the process when compared to friction coatings made in specialized machines that still have limited insertion in the industry compared to conventional CNC equipment, aluminizing coatings, laser coating and thermal spray coating. Substrate ABNT 1020 carbon steel plates with 200 x 100 x 8 mm and consumable aluminum rods 100 mm long and 15.4 mm in diameter were used as substrate. After deposition the samples were subjected to heat treatment of isothermal annealing at 650 ° C for 72 and 120 h. After the treatment, the cross section of the samples was evaluated by Scanning Electron Microscopy (SEM) and microhardness. The coatings obtained presented a thickness of approximately 1.5 mm with chemical composition and homogeneous hardness. The hardness values obtained were elevated, between 900 and 1000 HV, corresponding to the Fe₂Al₅ phase.

Keywords: Friction coating; Iron aluminides; Microstructure; Intermetallic.