



Copyright 2019, ABINOX, ABRACO, IPT

Trabalho apresentado durante o INOXCORR 2019 - Seminário Brasileiro de Aços Inoxidáveis como Solução Contra Corrosão, em São Paulo no mês de agosto de 2019.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Aços inoxidáveis modificados com boro processados por manufatura aditiva

Brenda J. M. Freitas¹, Guilherme Y. Koga², Claudemiro Bolfarini²

Resumo

Os componentes utilizados na indústria petroquímica são submetidos a condições severas, sendo necessário uma alta resistência ao desgaste e à corrosão. Os aços inoxidáveis exibem uma ótima combinação de propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, entretanto, possuem baixa resistência ao desgaste. Trabalhos pioneiros e recentes realizados no DEMa-UFSCar demonstraram que a adição de boro na composição de aços inoxidáveis conformados por spray promove a formação de boretos que aumentam significativamente a resistência ao desgaste desses materiais. No momento, essas ligas estão sendo produzidas a partir da manufatura aditiva (Selective Laser Melting), visto que esta técnica representa, atualmente, o estado da arte na fabricação de peças metálicas, sendo o seu desenvolvimento de grande interesse para a comunidade acadêmica-científica, além do grande apelo tecnológico, uma vez que a técnica de impressão em 3D aplicada nesta classe de ligas apresenta o potencial de permitir a fabricação, em tempo muito curto, de peças de geometria complexa que falharam em serviço em plataformas de óleo, refinarias e demais indústrias de processos químicos.

Palavras-chave: Superduplex, boretos, impressão em 3D, indústria petroquímica.

Introdução

Apesar dos grandes avanços tecnológicos para a produção de energia limpa e renovável, a energia proveniente de combustíveis fósseis continuará sendo significativa nas próximas décadas [1]. Sendo assim, materiais de engenharia para aplicações relativas à produção de energia de origem fóssil são essenciais para uma exploração eficaz, segura e durável. Os aços inoxidáveis superduplex possuem propriedades adequadas e, portanto, são potenciais candidatos para aplicações em que se demanda alta resistência mecânica e à corrosão. Entretanto, esses materiais apresentam baixa resistência ao desgaste, o que compromete o seu uso em determinadas aplicações [2].

¹ Doutoranda em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM/UFSCAR

² Doutor – DEMa e PPGCEM/UFSCAR



Nos últimos anos, grupos de pesquisa do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa-UFSCar), através da conformação por spray, vem desenvolvendo estudos pioneiros baseados na adição de elevados teores de boro em aços inoxidáveis ferríticos, superduplex e supermartensíticos com o intuito de promover a formação de uma microestrutura refinada com partículas de boretos homogeneamente distribuídas na matriz [3-9]. Essas investigações indicaram que esta abordagem melhora consideravelmente a resistência ao desgaste desta classe de materiais, visto que as partículas duras de boretos protegem a matriz contra o desgaste.

Baseando-se nos excelentes resultados relacionados às características microestruturais-tribológicas dos aços inoxidáveis modificados com boro produzidos por spray forming, o grupo de pesquisa do DEMa-UFSCar visa ampliar o conhecimento desta classe de ligas a partir do processamento via manufatura aditiva. Em crescente ascensão nos últimos anos, a manufatura aditiva permite a obtenção de componentes com geometrias complexas e características microestruturais refinadas, podendo se tornar uma potencial rota de processamento de aços inoxidáveis, seja para a produção de peças para a indústria de processos químicos ou como reparo/substituição de componentes utilizados na perfuração/exploração de poços petrolíferos [10].

Portanto, este trabalho tem o objetivo de investigar a evolução microestrutural, as características mecânicas e a resistência ao desgaste e à corrosão de aços inoxidáveis superduplex modificados com boro obtidos através da técnica de manufatura aditiva (Selective Laser Melting). A técnica de impressão em 3D pode ser muito útil na fabricação de componentes em tempo muito curto para a substituição de peças que falharam em serviço na exploração de óleo em plataformas e nas refinarias.

Metodologia

As composições dos aços inoxidáveis superduplex, desenvolvidos no DEMa-UFSCar, foram selecionadas baseando-se nos ótimos resultados anteriores do grupo relativo a microestrutura e resistência ao desgaste do material conformado por spray [7, 8]. As composições estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química (em %p) das ligas selecionadas.

Ligas	Cr	B	Ni	Mo	C	N	Mn	Si
SD-3 ^a	25	3	5,5	2,5	0,06	0,1	1	1,5
SD-0,8 ^a	24	0,8	4	2	0,06	0,5	-	-

^a As ligas também serão produzidas sem a adição de B para fins de comparação.

Os materiais em pó das composições dos aços inoxidáveis com e sem a adição de boro serão preparados no atomizador presente no Laboratório de Atomização e Revestimentos do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos (DEMa-UFSCar). Os materiais em pó dos aços inoxidáveis com e sem a adição de boro serão utilizados para a produção dos componentes com geometria complexa por meio da técnica Selective Laser Melting.

As partículas em pó produzidas na etapa de atomização e as peças obtidas por manufatura aditiva (SLM) serão caracterizadas em termos de composição química, tamanho de grão,



fração de fase e morfologia. Portanto, serão utilizadas as técnicas de difração de raios-X (DRX), microscopia ótica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV-EDS) e microscopia eletrônica de transmissão (MET). A caracterização mecânica global das ligas com e sem a adição de boro, obtidas por manufatura aditiva, será realizada através do ensaio de tração (ASTM E8/E8M-16a), compressão (ASTM E9-09), dureza Rockwell (ASTM E18-18a) e microdureza Vickers (ASTM E92-17).

Juntamente com os ensaios de microdureza Vickers, os ensaios de pino-sobre-disco serão utilizados para analisar as propriedades tribológicas dos aços inoxidáveis com e sem a adição de boro obtidos por SLM.

Na realização dos ensaios de corrosão serão utilizadas células eletroquímicas convencionais de três eletrodos, com contra eletrodo de platina e eletrodo de referência de calomelano saturado. Os ensaios serão realizados em um eletrólito que simule a água do mar, preparado segundo a norma ASTM D1141-98. Para garantir a presença de oxigênio dissolvido na solução, ar será borbulhado durante 30 minutos antes dos ensaios eletroquímicos. Serão realizadas análises de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) e de polarização potenciodinâmica.

Resultados e discussão

Os resultados anteriores do grupo indicam que a adição de 3 %p de B em um aço inoxidável superduplex conformado por spray promove a formação de boretos do tipo $(M=Fe, Cr)_2B$ e $(M=Fe, Mo)_3B_2$ com morfologia facetada dispersos na matriz predominantemente austenítica (γ), como pode ser visto na Figura 1.

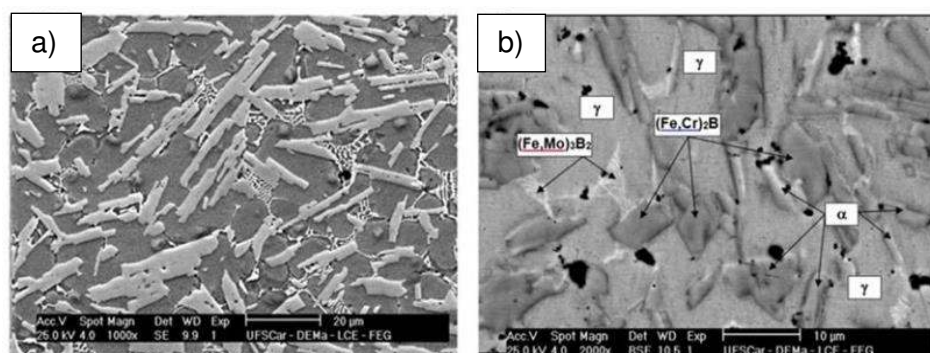


Figura 1. Micrografias obtidas por MEV do aço inoxidável superduplex modificado com 3 %p de B obtidas a partir dos modos (a) SE e (b) BSE [7].

Os mecanismos de solidificação desta liga obtida a partir da conformação por spray foram avaliados. Neste trabalho, os resultados obtidos serão analisados com o intuito de se compreender os mecanismos de formação dos boretos em condições de solidificação fora do equilíbrio dos aços inoxidáveis superduplex obtidos pela técnica de manufatura aditiva (Selective Laser Melting).

Pelos resultados disponíveis para outras composições de aços inoxidáveis obtidos via manufatura aditiva, espera-se obter uma microestrutura refinada de grãos colunares e com partículas de boro entre os grãos. Contudo, uma vez que estudos envolvendo o processamento de aços inoxidáveis modificados com boro através da técnica de manufatura aditiva não foram encontrados na literatura, será avaliada o efeito das características de processo (alta taxa de resfriamento,



solidificação direcional e ciclo térmico complexo) nas ligas devido a manufatura “camada por camada” do componente.

De modo geral, espera-se obter propriedades mecânicas satisfatórias, principalmente no que diz respeito ao incremento da resistência ao desgaste das ligas modificadas com boro. Adicionalmente, deseja-se manter o compromisso de uma boa resistência à corrosão das ligas mesmo após a adição de boro, obtendo-se uma combinação de elevada resistência ao desgaste sem depreciação da resistência à corrosão.

Conclusões

A adição de boro na faixa de 0,3 – 4 %p permite um aumento considerável da resistência ao desgaste dos aços inoxidáveis sem que ocorra depreciação da resistência à corrosão, fazendo com que estes materiais apresentem um enorme potencial de aplicação na indústria petrolífera devido a ótima combinação de propriedades tribológicas-corrosão.

A manufatura aditiva representa o estado da arte na fabricação de peças metálicas, apresentando um grande apelo tecnológico-científico, visto que esta técnica aplicada nesta classe de ligas apresenta o potencial de permitir a fabricação personalizada e em tempo muito curto de peças de geometria complexa que falharam em serviço na indústria petroquímica.

Referências bibliográficas

- [1] ONU, 2015. Revision of world population prospects (n.d.). <https://esa.un.org/unpd/wpp/> (acessado em 14 de março de 2019).
- [2] ASM International: ASM Handbook Volume 18. Friction, Lubrication, and Wear Technology (ASM International, Materials Park, 1992).
- [3] Sigolo, E.; Soyama, J.; Zepon, G.; Kiminami, C.S.; Botta, W.J.; Bolfarini, C. Wear resistant coatings of boron-modified stainless steels deposited by Plasma Transferred Arc. *Surface and Coatings Technology*, v. 302, pp. 255-264, 2016.
- [4] Zepon, G.; Nascimento, A.R.C.; Kasama, A.H.; Nogueira, R.P.; Kiminami, C.S.; Botta, W.J.; Bolfarini, C. Design of wear resistant boron-modified supermartensitic stainless steel by spray forming process. *Materials and Design*, v. 83, pp. 214-223, 2015.
- [5] Zepon, G.; Kiminami, C.S.; Botta, W.J.; Bolfarini, C. Microstructure and Wear Resistance of Spray-Formed Supermartensitic Stainless Steel. *Materials Research*, v. 16(3), pp. 642-646, 2013.
- [6] Zepon, G.; Nogueira, R.P.; Kiminami, C.S.; Botta, W.J.; Bolfarini, C. Electrochemical Corrosion Behavior of Spray-Formed Boron-Modified Supermartensitic Stainless Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 48(4), pp. 2077-2089, 2017.
- [7] Soyama, J.; Zepon, G.; Lopes, T.P.; Beraldo, L.; Kiminami, C.S.; Botta, W.J.; Bolfarini, C. Microstructure formation and abrasive wear resistance of a boron-modified superduplex stainless steel produced by spray forming. *Journal of Materials Research*, v. 31(19), pp. 2987-2993, 2016.
- [8] Soyama, J.; Lopes, T.P.; Zepon, G.; Kiminami, C.S.; Botta, W.J.; Bolfarini, C. Wear Resistant Duplex Stainless Steels Produced by Spray Forming. *Metals and Materials International*, 2018.
- [9] Lopes, T.P. Utilização de simulação termodinâmica para desenvolvimento de aços inoxidáveis modificados com boro conformados por spray: aplicações e limitações. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de São Carlos, pp. 107, São Carlos, 2016.
- [10] Frazier, W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering*



and Performance, v. 23(6), pp. 1917-1928, 2014.