

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE REVESTIMENTO DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO DEPOSITADO POR ASPERSÃO TÉRMICA A ARCO ELÉTRICO SOBRE AÇO BAIXO CARBONO

André Henrique Barth, andrehbarth@hotmail.com¹

Natália Freitas Daudt, natalia.daudt@ufsm.br¹

Cristiano José Scheuer, cristiano.scheuer@ufsm.br¹

¹ Grupo de Tecnologia e Mecânica dos Materiais – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSM, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

Igor Giacomelli Zanella, igor.zanella90@gmail.com²

Gustavo Bavaresco Sucharski, gustavobavaresco@gmail.com²

² Institutos LACTEC, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 80210-170, Curitiba, PR, Brasil.

Resumo. *Várias técnicas de engenharia de superfície podem ser empregadas para melhorar o desempenho dos materiais de engenharia aos seus principais modos de falha. Tais modificações podem envolver desde mudanças na composição química ou microestrutura da superfície, ou mesmo a deposição de revestimentos. Dentre as técnicas de deposição de revestimentos, a aspersão térmica destaca-se pela sua versatilidade e eficiência. Por meio destes processos é possível promover a funcionalização de superfícies, tornando-as resistentes aos diferentes fenômenos que promovem a sua degradação. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar as características microestruturais de revestimento de aço inoxidável austenítico, obtido através da deposição do consumível AWS ER 308LSi sobre aço ABNT 1020 pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico (APS). O revestimento foi caracterizado microestruturalmente por meio das técnicas de difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por medidas de microdureza na escala Vickers. Os resultados obtidos evidenciam que a morfologia do revestimento é constituída por lamelas, óxidos, salpicos e poros; sendo composto pelas fases metálicas ferrita (Fe- α) e austenita (Fe- γ), e pela fase cerâmica de óxido de ferro tipo magnetita (Fe₃O₄). O perfil de dureza evidencia um tênue acréscimo nos valores da dureza superficial com transição suave ao substrato, apresentando uma dureza de topo da ordem de 320 HV.*

Palavras chave: *Aspersão Térmica, Aço Inoxidável Austenítico, Caracterização Microestrutural.*

Abstract. *Several surface engineering techniques can be employed to improve the performance of engineering materials to its main failure modes. Such modifications may involve changes in the chemical composition or microstructure of the surface, or even coatings deposition. Among the coating deposition techniques, thermal spray stands out for its versatility and efficiency. Through these processes, it is possible to promote the surfaces functionalization, making them resistant to the different phenomena that promote their degradation. In this context, this work aimed to evaluate the microstructural characteristics of austenitic stainless steel coating, obtained by deposition of the AWS ER 308LSi consumable on ABNT 1020 steel substrate by the arc spray (APS) thermal spray process. Coating was microstructurally characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and laser confocal (LSCM) microscopy, and by Vickers microhardness measurements. The obtained results show that the coating morphology consists of lamellae, oxides, splashes and pores; being composed of the ferrite (Fe- α) and austenite (Fe- γ) metallic phases, and magnetite-type iron oxide (Fe₃O₄) ceramic phase. The hardness profile shows a slight increase in the surface hardness values with a smooth transition to the substrate showing a top-surface hardness of approximately 320 HV.*

Keywords: *Thermal Spray, Austenitic Stainless Steel, Microstructural Characterization.*

1. INTRODUÇÃO

O propósito dos tratamentos de superfície é prover um melhor desempenho do componente frente ao meio degradante (desgaste, corrosão e/ou alta temperatura) ao qual ele estiver exposto. Os tratamentos de superfície permitem melhorar as propriedades da superfície para responder a qualquer requisito específico, enquanto o volume da peça mantém suas propriedades estruturais originais. No entanto, para a maioria das aplicações a superfície ideal ainda está sendo trabalhada. Esta é uma busca contínua, pois pode contribuir para a redução de custos, seja pela diminuição de reparos ou substituição de componentes (D'Oliveira *et al.* 2001).

Neste contexto, ao longo das últimas décadas os processos de aspersão térmica vêm continuamente ganhando interesse científico e industrial, principalmente devido à sua versatilidade e eficiência. A aspersão térmica é constituída por um grupo de técnicas que permitem depositar revestimentos metálicos, não metálicos ou misturas destes na forma de camadas, sobre um substrato previamente preparado (Sucharski, 2016).

A aplicação dos revestimentos aspergidos termicamente, de modo geral, visa aproveitar as vantagens das propriedades específicas do material depositado, e com isso aumentar a resistência do substrato aos modos de falha atuantes no seu ambiente de uso. Neste sentido, para limitar o dano por corrosão em ambientes aquosos potencialmente corrosivos, empregam-se revestimentos aspergidos termicamente à base de aços inoxidáveis (Kawakita, *et al.* 2002; Liu, *et al.* 2014).

Conforme demonstrado na literatura, comparativamente os revestimentos de aço inoxidável aspergidos termicamente não mantêm a resistência à corrosão original da liga a granel correspondente. Isso decorre devido às características microestruturais e composição significativamente modificadas dos revestimentos aspergidos (Kawakita, *et al.* 2002; Ahmed, *et al.* 2010).

Embora essa diferença de desempenho tenha sido identificada, ainda não é bem compreendido qual aspecto da microestrutura do revestimento que é o principal responsável por ela. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo estudar as características microestruturais de um revestimento de aço inoxidável austenítico depositado pelo processo ASP sobre aço baixo carbono.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A matéria-prima empregada para a realização deste trabalho consistiu em barras de aço ABNT 1020 (substrato) e arame de soldagem AWS ER 308LSi (revestimento), cujas composições químicas são descritas na Tabela 1. Amostras nas dimensões de 10×50×100 mm (espessura × largura × comprimento) foram confeccionadas a partir das barras comerciais de aço. Após corte, as amostras foram submetidas à operação de jateamento abrasivo com o intuito de obter-se nestas a rugosidade necessária ao ancoramento dos revestimentos aspergidos termicamente. Para realização do jateamento abrasivo, foi utilizada uma cabine de jateamento da marca CMV modelo 65 9075, adotando-se os parâmetros apresentados na Tabela 2, os quais foram determinados com base naqueles adotados por Pukasiewicz *et al.* (2012).

Tabela 1. Composição química dos metais de base e adição usados neste trabalho.

Materiais	Elementos químicos (wt%)							
	Fe	C	Cr	Ni	Mn	Si	S	P
AWS ER 308LSi	Bal.	0,023	20,0	10,1	1,55	0,75	-	-
ABNT 1020	Bal.	0,2	-	-	0,4	-	0,04	0,03

Tabela 2. Parâmetros adotados no jateamento dos corpos de prova à serem revestidos.

Parâmetro	Valores empregados
Abrasivo	Óxido de alumínio branco (#36 mesh)
Pressão de jateamento	55-60 psi
Distância de jateamento	100 mm
Rugosidade – Ra (mínima/máxima)	7,6/9,38
Ângulo de jateamento	90°
Tempo de jateamento	2 min

Os revestimentos foram aplicados imediatamente após as amostras terem sido jateadas. Para a deposição dos revestimentos, empregou-se uma fonte elétrica marca Eutronic modelo Eutronic Arc Spray 4, e uma pistola de aspersão a arco elétrico da mesma marca. Os parâmetros que foram empregados durante as deposições são apresentados na Tabela 3. Estes parâmetros foram determinados através de ensaios preliminares.

Tabela 3. Parâmetros utilizados na deposição dos revestimentos.

Parâmetro	Valores empregados
Corrente	135 A
Tensão	30 V
Gás de transporte	Ar comprimido
Pressão do gás de transporte	60 psi
Distância pistola-peça	200 mm
Temperatura de pré-aquecimento	150 °C
Espessura do revestimento	800 ± 100 mm
Metal de adição	AISI 308LSi (Ø: 1.0 mm)

Após a deposição, foram preparados corpos de prova a partir da amostra revestida para realização das caracterizações metalográficas, de microdureza, de topografia e de difração de raios X. As amostras foram seccionadas na sua região mediana utilizando uma cortadeira metalográfica marca Struers-Panambra modelo Mesoton, obtendo-se dois corpos de prova, conforme indicação da Figura 1. Estes corpos de prova foram cortados através de uma cortadeira de precisão da marca Buehler modelo Isomet 1000, de modo a obter-se corpos de provas de menor tamanho. Dois destes corpos de prova foram embutidos, empregando resina de embutimento a quente tipo Baquelite, em uma prensa embutidora metalográfica de amostras da marca Risitec modelo RS-30; sendo um destes embutido para análise da seção transversal e outra da seção longitudinal.

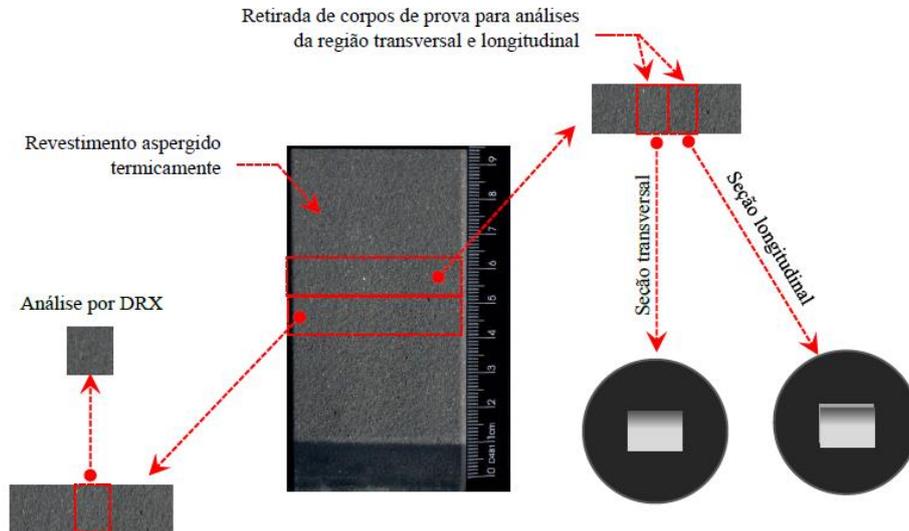


Figura 1. Indicação dos cortes realizados nas amostras revestidas para obter os corpos de provas para as caracterizações.

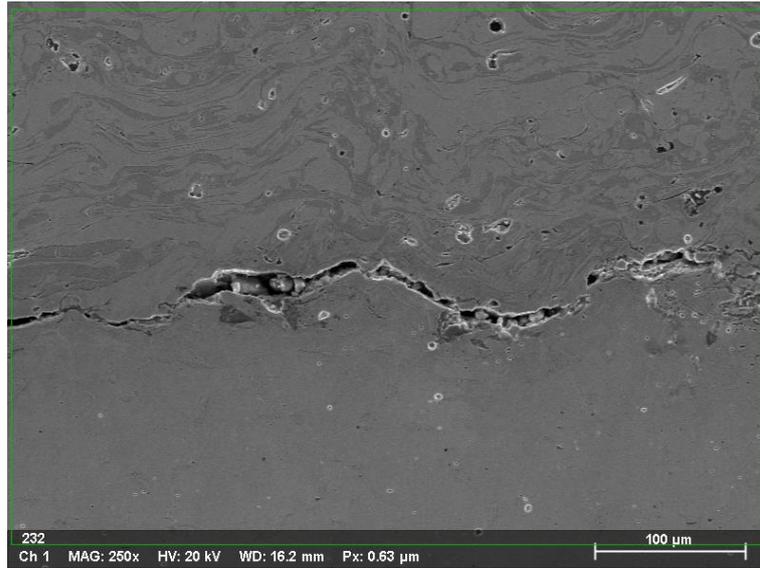
Estas análises consistiram na avaliação metalográfica do revestimento, com o objetivo de avaliar as suas características microestruturais; e na avaliação da microdureza Vickers. Para efetuar a primeira caracterização, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura da marca JEOL modelo JSM 6360; e para a segunda, um microdurômetro da marca Shimadzu modelo HMU-2, empregando-se uma carga de 300 gf, com tempo de aplicação de carga de 15 s. Antes de efetuar estas caracterizações, após o embutimento das amostras, estas foram preparadas por meio de operações de lixamento (utilizando-se lixas de carboneto de silício de 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh) e polimento (utilizando-se um disco de feltro e suspensão abrasiva de alumina com partículas de 1 μ m), ambas as operações realizadas utilizando-se uma lixadeira politriz da marca Struers-Panambra modelo DP-10. Para revelação da microestrutura, empregou-se o reativo Nital 5% (5ml de ácido nítrico + 95ml de Álcool Etilico). O outro corpo de prova foi destinado à caracterização das fases metalúrgicas presentes na superfície refundida, a qual foi realizada usando um difratômetro marca Shimadzu modelo XRD 7000. Adicionalmente, mapas de composição química foram obtidos utilizando um sistema de espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS) (marca Bruker, modelo NanoCompact) interfaceado ao microscópio eletrônico de varredura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

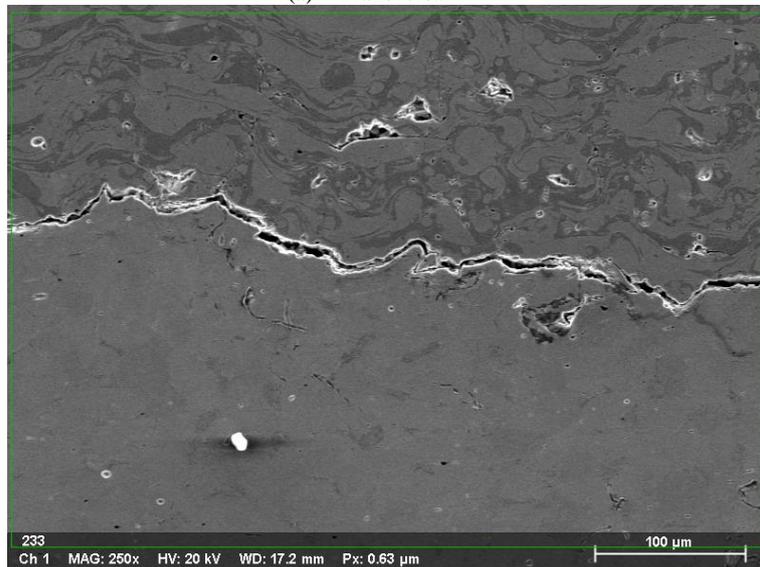
Na Figura 2 é apresentada a morfologia das seções transversal (a), longitudinal (b) e superficial (c) dos revestimentos aspergidos termicamente.

A partir das Figura 2a e Figura 2b pode ser observado que o revestimento é constituído por:

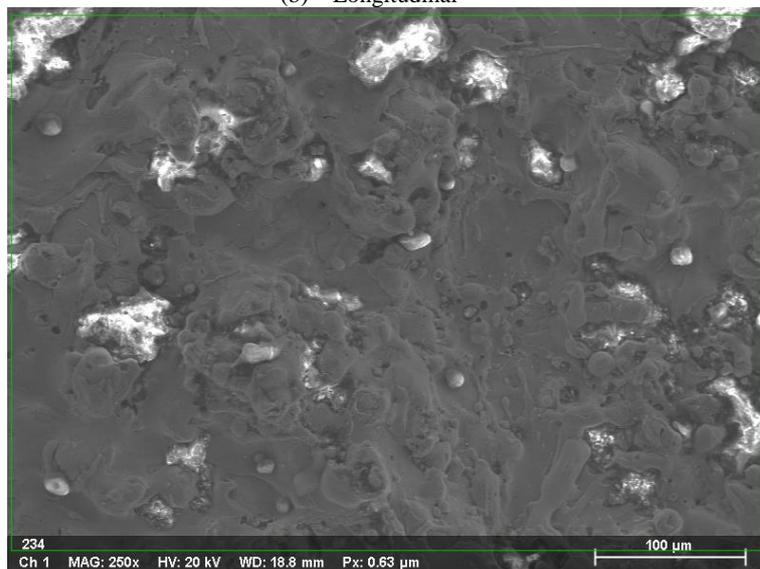
- Lamelas (panquecas): correspondem às partículas aspergidas, as quais na Figura 2, apresentam geometria alongada paralela à superfície do substrato, em uma tonalidade acinzentada mais clara;
- Filmes de óxidos: localizados nos contornos das panquecas (interlamelares), os quais na Figura 2, apresentam uma tonalidade acinzentada mais escura.
- Porosidade: microporos localizados entre as panquecas e filmes de óxidos, os quais na Figura 2, coloração similar à das lamelas;
- Partículas não fundidas (salpicos): as quais na Figura 2, apresentam simetria próxima à esférica, apresentando uma tonalidade preta.



(a) – Transversal



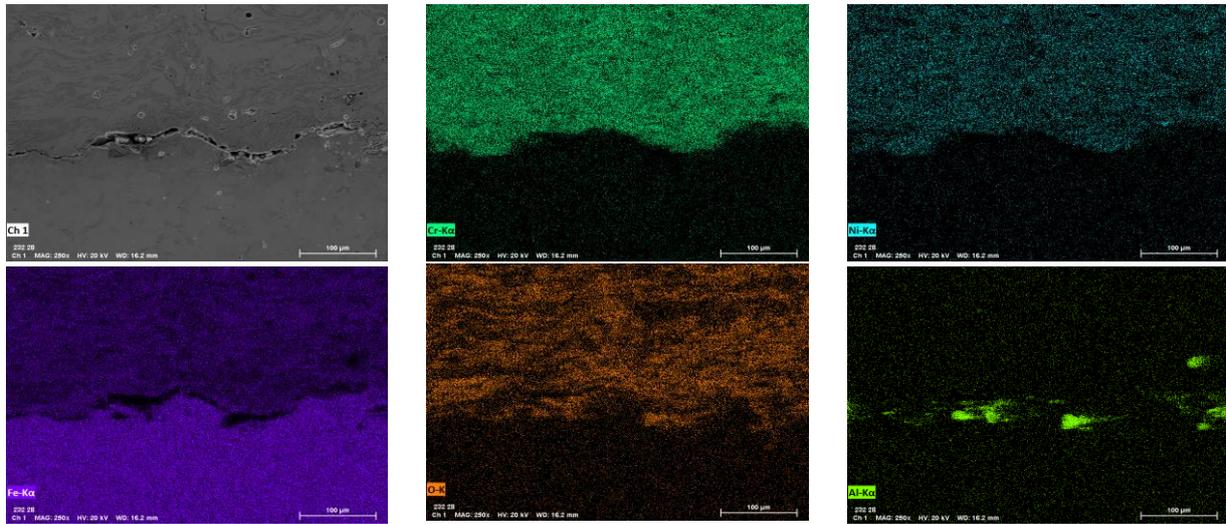
(b) – Longitudinal



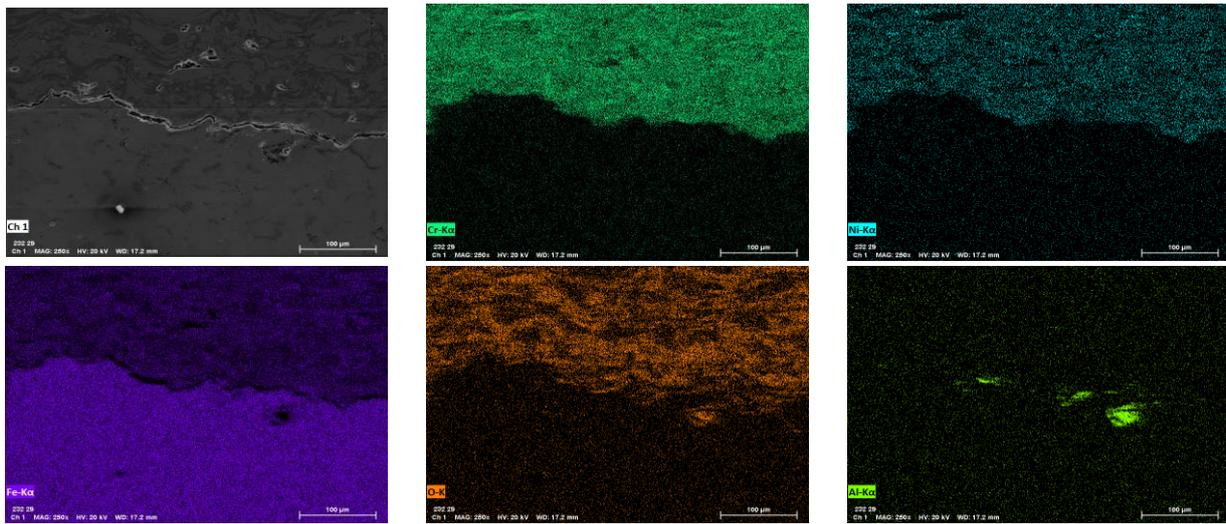
(c) – Superficial

Figura 2. Microestrutura das seções transversal (a), longitudinal (b) e superfície (c) do revestimento aspergido termicamente.

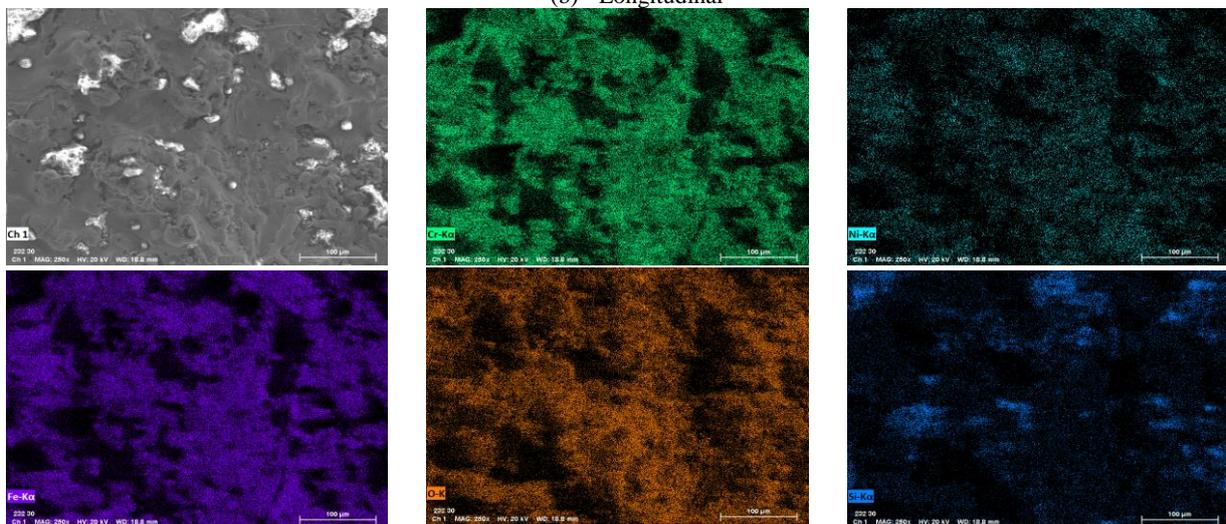
Na Figura 3 é evidenciada a distribuição dos principais elementos químicos nas seções transversal (a), longitudinal (b) e superficial (c) dos revestimentos aspergidos termicamente.



(a) - Transversal



(b) - Longitudinal



(c) - Superficial

Figura 3. Mapas de distribuição dos elementos químicos obtidos por EDS das seções transversal (a), longitudinal (b) e superfície (c) do revestimento aspergido termicamente.

Nota-se que, conforme esperado, o revestimento é constituído basicamente por cromo (Cr), níquel (Ni), ferro (Fe) e oxigênio (O), este último concentrado ao entorno das panquecas. Também, é possível identificar a ocorrência de traços de alumínio (Al) nas seções transversal e longitudinal, o qual possivelmente está relacionado ao ancoramento das partículas do abrasivo utilizado durante o polimento da amostra, na etapa de preparo metalográfico. Adicionalmente, traços de silício (Si) foram identificados na superfície do revestimento provavelmente advindos de contaminações que ocorreram durante o processo de deposição.

Na Figura 4 são apresentados os perfis de microdureza Vickers medidos nas seções transversal e longitudinal dos revestimentos aspergidos termicamente.

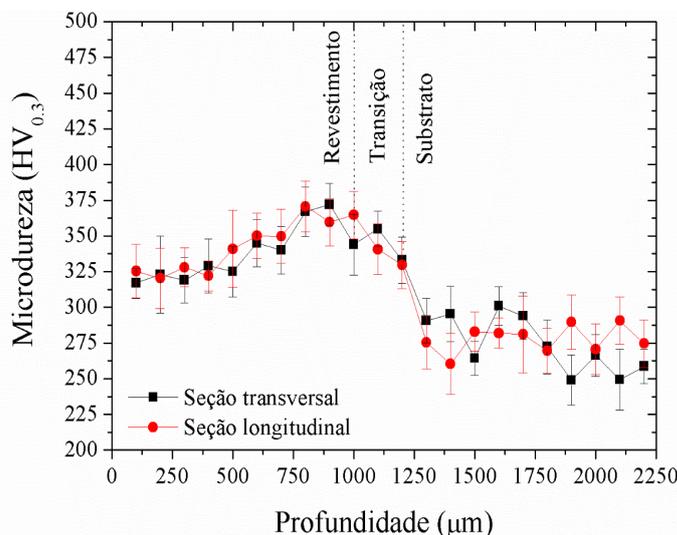


Figura 4. Perfil de microdureza na seção transversal e longitudinal dos revestimentos aspergidos termicamente.

É possível observar que não há variação nos valores de dureza medidos na seção transversal com aqueles da seção longitudinal. Verifica-se também que, para ambas as seções de medição, os valores de dureza aumentam a partir da superfície da amostra até a região de ligação com o substrato. Esse resultado, segundo Lima e Trevisan (2007), deve-se à maior adesão das lamelas ao substrato, e à menor coesão entre as lamelas à medida em que estas estão mais distantes deste. Da mesma forma, é possível notar a partir da Figura 4, que há uma região de transição entre os valores de dureza máximos do revestimento e os valores correspondentes aos do substrato. Segundo Paredes *et al.* (2019), essa região de transição corresponde às regiões onde o material do revestimento dilui-se ao metal de base, ou difunde-se neste. Lima e Trevisan (2007) destacam que a ondulação da superfície do substrato pode influenciar sobre a extensão da região de transição. Conforme indicado previamente na Figura 3, a extensão da região de transição é da ordem de 50 a 100 µm. É importante destacar que a baixa coesão entre as lamelas na região mais externa do revestimento, também promove uma menor resistência do revestimento ao desgaste por abrasão e erosão (Pukasiewicz *et al.*, 2012).

Na Figura 5 é apresentado o padrão de difração de raios X do revestimento aspergido termicamente na condição como depositado.

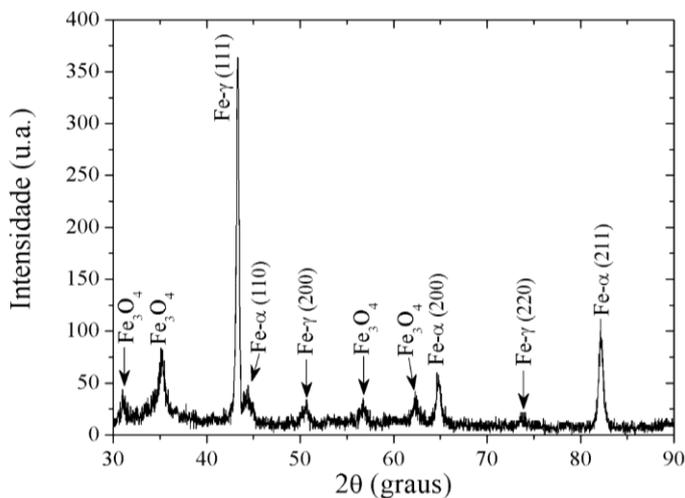


Figura 5. Padrão de difração de raios X do revestimento aspergido termicamente.

Verifica-se que o espectro de DRX é constituído basicamente por picos das fases austenita (γ), ferrita (α) e óxido de ferro (Fe_3O_4). A presença de picos da fase α , embora não esperada, também foi verificada por Adachi e Ueda (2018) e Kutschmann *et al.* (2019) em revestimentos de aço inoxidável austenítico AISI 316 L depositados pelos processos de aspersão térmica a frio (*Cold Spray*) e HVOF, respectivamente, sobre aço carbono. Embora os autores citados não tenham discutido a ocorrência desta fase, acredita-se que esta ocorra em função da estrutura aspergida ser equivalente à “bruta de solidificação”. Conforme pode ser verificado pela análise do diagrama pseudo-binário do sistema Fe-Cr-Ni, para teores de Ni de 10% e Cr de 20% (composição do consumível adotado neste trabalho), durante a solidificação ocorre a formação de uma estrutura bifásica composta por austenita e ferrita delta. A transformação da ferrita delta em austenita é completada somente se o aço permanecer por um tempo suficientemente longo na faixa de temperaturas na qual a cinética de transformação é mais rápida (Folkhard, 1988). Este não é o caso de revestimentos aspergidos termicamente, onde o resfriamento rápido causa a retenção de ferrita delta até a temperatura ambiente. A análise do diagrama de Schaeffler para a composição química do consumível utilizado evidencia que a microestrutura de solidificação deste é constituída por cerca de 10% de ferrita delta, o que justifica a ocorrência dos picos no espectro de DRX.

A ocorrência dos picos da fase Fe_3O_4 , por sua vez, é justificada em virtude deste óxido ser sintetizado por reação da gotícula metálica com o gás de atomização (ar comprimido), durante a sua projeção a partir do bico aspersor em direção à superfície do substrato. A formação de uma fase de óxido em oposição a um nitreto (dada o maior percentual de nitrogênio no ar quando confrontado ao teor de oxigênio – 78 e 21%, respetivamente) deve-se a maior entalpia de formação dos nitretos de ferro (+12.6 kJ/mol) quando comparada à de Fe_3O_4 (-744,8 kJ/mol) (Elder *et al.*, 1993).

4. CONCLUSÕES

Tendo em vista a importância dos tratamentos de superfície, esse trabalho apresentou as características microestruturais de um revestimento de aço inoxidável austenítico depositado pelo processo ASP sobre aço baixo carbono. Analisando a microestrutura, a distribuição de elementos químicos, o perfil de microdureza e a difração de raios X, pode se concluir que:

- Os microconstituintes do revestimento correspondem à lamelas, óxidos, salpicos e poros;
- O revestimento é composto quimicamente principalmente pelos elementos Cr, Ni e Fe, apresentando traços de Al na interface com o substrato e de Si na superfície;
- O revestimento é constituído pelas fases Fe- α , Fe- γ e Fe_3O_4 ; e,
- A dureza do revestimento é superior ao do substrato, apresentando valores superiores na região de transição.

5. REFERÊNCIAS

- Adachi S., Ueda, N., 2018. “Wear and Corrosion Properties of Cold-Sprayed AISI 316L Coatings Treated by Combined Plasma Carburizing and Nitriding at Low Temperature”. *Coatings*, v. 8(12), p. 456.
- Ahmed, N., Bakare, M.S., McCartney, D.G., Voisey, K.T., 2010. “The effects of microstructural features on the performance gap in corrosion resistance between bulk and HVOF sprayed Inconel 625”. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 204, p. 2294-2301.
- D’Oliveira, A.S.C.M., Paredes, R.S.C., Weber, F.P., Vilar, R., 2001. “Microstructural changes due to laser surface melting of an AISI 304 stainless steel”. *Materials Research*, Vol 4(2), p. 93-96.
- Elder, S.H.; Disalvo, F.J.; Topor, L.; Navrotsky, A., 1993. “Thermodynamics of Ternary Nitride Formation by Ammonolysis: Application to LiMoN_2 , Na_3WN_3 and $\text{Na}_3\text{WO}_3\text{N}$ ”. *Chemistry of Materials*, Vol. 5(10), p. 1-41.
- Folkhard, E., 1988. *Welding Metallurgy of Stainless Steels*. Springer-Verlag, New York-Wien.
- Kawakita, J., Fukushima, T., Kuroda, S., Kodama, T., 2002. “Corrosion behaviour of HVOF sprayed SUS316L stainless steel in seawater”. *Corrosion Science*. Vol. 44, p. 2561-2581.
- Kutschmann, P., Lindner, T., Börner, K., Reese U., Lampke, T., 2019. “Effect of Adjusted Gas Nitriding Parameters on Microstructure and Wear Resistance of HVOF-Sprayed AISI 316L Coatings”. *Materials*, v. 12(11), p. 176.
- Lima, C.C.; Trevisan, R., 2007. “Aspersão térmica: fundamentos e aplicações”. 2ª ed. São Paulo: Editora Artliber.
- Liu, W.-H., Shieu, F.-S., Hsiao, W.-T., 2014. “Enhancement of wear and corrosion resistance of iron-based hard coatings deposited by high-velocity oxygen fuel (HVOF) thermal spraying”. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 249, p. 24-41.
- Paredes, R.S.C., Nikkel, W., Sucharski, G.B.; Costa P.P.B., 2019 “Optimization of arc-sprayed iron-based tungsten carbide hard coatings on harvester blades”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 41, p. 217.
- Pukasiewicz, A.G.M., Oliveira, F.R.O., Capra, A.R., Paredes, R.S.C., 2012. “Influência da refusão por plasma na microestrutura de um revestimento Fe-Mn-Cr-Si depositado por aspersão térmica arco elétrico sobre aço inoxidável ASTM A743-CA6NM”. *Soldagem & Inspeção*, Vol. 17 (1), p. 65-75.
- Sucharski, G. B., 2016. “Estudo da erosão por cavitação sobre diferentes morfologias de revestimentos de FeMnCrSiB aplicados por aspersão térmica chama FS e HVOF com tratamento de shot peening”. 148 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.