

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICA E MICROESTRUTURAIS DE REVESTIMENTOS DE NÍQUEL OBTIDOS POR ASPERSÃO TÉRMICA

CON-2016-0529

Resumo: Este trabalho tem como finalidade avaliar e comparar revestimentos metálicos de ligas de Fe-Cr-Ni e Co-Cr-Ni obtidos pelo processo de aspersão a arco elétrico, depositados em substrato de aço carbono. Foram utilizados três arames diferentes, A (Fe-Cr), B (Fe-Cr-Ni) e C (Co-Cr-Ni). Estas combinações possibilitaram a avaliação de duas condições, uma condição produzida através de liga convencional, composta principalmente por cromo e níquel, e a outra condição uma liga com propriedades mecânicas superiores, contendo principalmente cobalto e cromo. Para a avaliação dos revestimentos foram realizadas, inicialmente, análises através de Microscopia Óptica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Com o objetivo de avaliar os percentuais de defeitos (poros, trincas, óxidos e partículas não fundidas) presentes em cada condição, foi realizado Processamento Digital de Imagem (PDI) a partir de imagens do MEV. De forma a analisar a aderência do revestimento, foi realizado Ensaio de Aderência (Pull-off test), de acordo com a Norma Petrobras N-2568. Os resultados obtidos para MEV, MO e PDI mostraram bastante uniformidade na camada aspergida, com percentual médio de defeitos de 3,70%. Em relação ao ensaio de aderência, a média das tensões de arrancamento foi de 26,82 MPa, atendendo ao requisito da norma utilizada (10 MPa).

Palavras-chave: Aspersão térmica, Revestimentos metálicos

1. INTRODUÇÃO

Com o objetivo de aumentar a vida útil de máquinas e equipamentos, sempre se buscou alternativas de custo mais acessível e bom desempenho. Uma solução muito utilizada é o revestimento por Aspersão Térmica. Através de tal procedimento, reduz-se a necessidade do uso de peças de ligas metálicas de alto custo. Além disso, reduz-se a frequência da reposição de peças, uma vez que a deposição de uma liga com propriedades superiores aumenta a resistência à corrosão e ao desgaste da peça como um todo. Os revestimentos são responsáveis pela proteção contra a corrosão, o desgaste, além de isolamento térmico e elétrico. Estes isolam o substrato do meio externo e facilitam a recuperação de peças, uma vez que, identificado um problema na superfície, basta aplicar novamente uma camada de revestimento (Antunes, et al. 2015). Ghafouri-Azar et al. citam também a utilização deste tipo de revestimento em componentes de turbina a gás. Componentes de incineração de turbinas a gás são geralmente protegidos das altas temperaturas advindas dos gases de combustão através de uma fina camada de cerâmica termicamente aspergida.

Uma das maiores preocupações com relação a este processo diz respeito à questão da adesão do revestimento. As principais falhas neste tipo de processo são por trincamento ou descolamento (Antunes, et al., 2015). Além da preparação da superfície do substrato, a adesão é também influenciada pela distância da tocha à peça e pelo tipo do processo de aspersão térmica utilizada (Zaat, 1983). Para um melhor resultado de adesão do revestimento, é importante também o aquecimento do substrato. Estudos realizados por Pershin et al., mostram que a adesão aumenta (de 10MPa para 74MPa) quando um substrato de aço inoxidável é aquecido a 650°C. Isto acontece porque quando o aço inoxidável é aquecido, forma-se uma película de óxido na superfície, que atua como uma barreira térmica e reduz a taxa de resfriamento das partículas fundidas, suprimindo a dispersão das mesmas. Além disso, Paredes afirma que o

aquecimento do substrato também auxilia na limpeza final da superfície do mesmo, pois gera a queima e volatilização de graxas, óleos e da umidade que ficam retidos na superfície do metal. Adicionalmente, o aquecimento favorece ainda a redução das tensões internas, influenciando na aderência do revestimento

Um outro grande problema inerente ao processo de aspersão são os defeitos, dentre eles óxidos, porosidades, inclusões e microtrincas. As porosidades são capazes de permitir que líquidos ou até que gases penetrem até o substrato, constituindo um grave problema, uma vez que a penetração de substâncias indesejáveis acelera o processo de degradação do material. Os revestimentos realizados por aspersão térmica podem apresentar porosidade de até 20% (Freitas, 2015). Além disso, a porosidade afeta diretamente na redução das propriedades físicas do revestimento, como condutividade elétrica e térmica e módulo de elasticidade do material, diminuindo também a coesão das camadas e sua aderência ao substrato (Paredes, 2012)(McPHERSON, 1989).

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O processo de aspersão térmica utilizado no presente trabalho é por arco elétrico. Neste caso, serão utilizados dois arames como eletrodos, que se fundirão no bico da pistola por diferença de potencial. A Tabela 1 mostra a composição dos arames utilizados. A Tabela 2 mostra a combinação utilizada dos arames para a obtenção do revestimento.

Tabela 1. Composição química dos arames utilizados no processo de Aspersão Térmica.

Arame	% Fe	% Co	% Cr	% Ni	% B	% Mn	% W	% Mo	% C	% Si
A	66,1		27		3,5	1,8				1,6
B	65,7		25,7	2,9		1,9		0,8	1,6	1,4
C	3,6	58,4	28,8	1,9		0,9	4,9	0,02	1,1	0,3

Tabela 2. Combinação dos arames para revestimento.

Condição	Combinação dos arames	Principal composição química
1	A + B	Ni e Cr
2	A + C	Co, Ni e Cr

Estes arames foram depositados através de aspersão térmica por arco elétrico em um substrato de aço SAE 1020. Os corpos de prova utilizados neste trabalho foram chapas. Primeiramente, as amostras passaram pelo processo de limpeza mecânica por jateamento abrasivo grau Sa 2 ½ utilizando abrasivo de óxido de alumínio G.20, de forma a garantir o ancoramento mecânico das partículas. Após o processo de limpeza mecânica, aplicou-se uma camada de liga intermediária em uma das faces de cada amostra, seguido da aplicação do revestimento com a espessura pré-definida de 1,9 mm. A partir de experimentos anteriores e seguindo a literatura técnica, foram escolhidos os parâmetros considerados adequados para a obtenção dos revestimentos, e estes são mostrados na Tabela 3 (Brito, 2010).

Tabela 3. Parâmetros utilizados no processo de aspersão térmica.

Parâmetro	Valor/Informação
Tensão	40 V
Corrente	100 A
Distância de projeção	Aproximadamente 100 mm
Número de passes	3 a 6
Taxa de deposição	3,24 kg/h
Diâmetro dos arames	1,6 mm
Gás atomizante	Argônio

As chapas foram cortadas, no sentido transversal, na máquina de corte AROTEC modelo COR-80. Foram utilizados discos com dureza na faixa de 35 a 50 HRC, utilizando um lubrificante a fim evitar o aquecimento excessivo dos corpos de prova. Após o corte, as amostras foram embutidas em resina baquelite, através do equipamento AROTEC modelo PRE-30. Em seguida, as amostras foram lixadas na polítrix modelo Aropol2V, com a seguinte sequência granulométrica: 100, 220, 320, 400, 600. Após o lixamento, foi realizado polimento nas amostras com abrasivo de pasta de diamante de 6µm, 3µm e 1µm, também utilizando a polítrix universal modelo Aropol2V.

Para uma avaliação microestrutural do revestimento e identificação das regiões presentes nas amostras, foi utilizado o microscópio óptico da OLYMPUS, modelo BX 60 MF. Foram utilizados aumentos de 100x, para visualização das três regiões (substrato, liga intermediária e revestimento), e de 500x, de forma a observar os defeitos do revestimento. Adicionalmente, micrografias foram obtidas através do Microscópio Eletrônico de Varredura (M.E.V.) CamScan 3200LS. Para a obtenção da imagem foi utilizado elétron secundário (SEI), voltagem de 20 kV e aumento de

300 vezes. Para cada condição foram observados espectros de EDS (espectroscopia de energia dispersiva) via análise por linha e por ponto.

Processamento Digital de Imagem (PDI) foi realizado a partir de imagens obtidas no MEV, de acordo com os parâmetros citados. Foram obtidas 10 micrografias de cada condição, de forma a varrer toda a seção transversal do revestimento e obter uma média de defeitos encontrados. As imagens foram processadas através do software FIJI Image.

Para realizar o ensaio de Pull-of, foi utilizado o Medidor de Aderência Pneumático da marca PATTI 110, fabricante SEMicro (número de série IM1010-1) e pistão F8. Foram colados dois tarugos no revestimento de cada chapa com adesivo epóxi da marca Araldite, fabricante Brascola, com tempo de secagem de 10 minutos e cura de 24 horas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para microscopia óptica mostraram uma estrutura lamelar no revestimento, típica de materiais aspergidos termicamente. As imagens de microscopia óptica obtidas para a condição 1 podem ser observadas na Figura 1. Foram observadas algumas partículas não fundidas, porosidades do tipo 1 (que são aquelas formadas entre as lamelas e causadas pelo empilhamento de partículas separadas, ou sejam, possuem geometria bastante alongada, pois acompanham o formato dessas lamelas) (Lira, 2012), porosidades do tipo 7 (que são aquelas que resultam em micro trincas, independentemente de sua origem de formação), outros formatos de porosidade (alguns mais arredondados e outros mais alongados), e óxidos em forma de rede que possuem a cor mais acinzentada (Freitas, 2015).

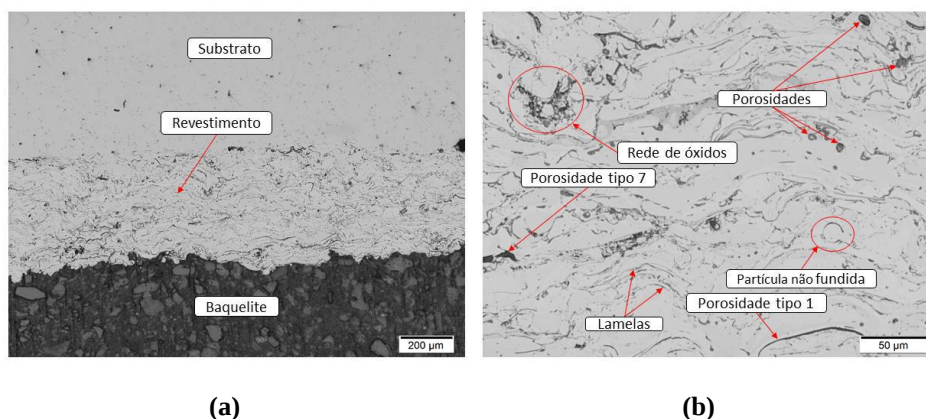
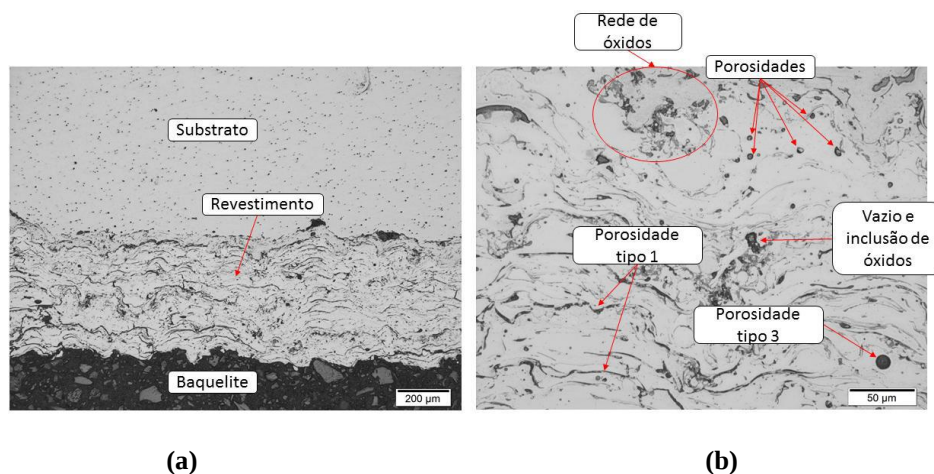


Figura 1. (a) Regiões da amostra de condição 1 utilizando-se uma lente de aumento de 100x. (b) Região do revestimento da amostra de condição 1 utilizando-se um aumento de 500x.

Os resultados obtidos para a condição 2 são mostrados na Figura 2. O revestimento desta amostra apresentou porosidades do tipo 3 (que se manifestam na forma de bolhas de gás causada pela dissolução do gás no metal fundido que se desenvolveram com o resfriamento do metal, e possuem geometria bastante arredondada), óxidos, vazios e outros tipos de porosidade, e assim como na condição 1, alguns mais arredondados e outros mais alongados. (Freitas, 2015). Podemos observar, ainda, que existe uma semelhança microestrutural grande entre os revestimentos de ambas condições, porém, a imagem de condição 2 apresentou uma estrutura com maior número de trincas e/ou porosidades interlamelares. Deve-se avaliar uma quantidade maior de regiões para que seja possível uma avaliação mais precisa, que será feita na quantificação de defeitos por procedimento por análise de imagem. Essa diferença no número de óxidos, trincas, vazios e poros entre as condições vai depender de como foi realizada a aspersão térmica, pois um dos fatores responsáveis pela qualidade do revestimento depositado é a adesão entre as partículas depositadas.



(a)

(b)

Figura 2. (a) Regiões da amostra de condição 2 utilizando-se uma lente de aumento de 100x. (b) Região do revestimento da amostra de condição 2 utilizando-se um aumento de 500x.

Através da utilização da técnica de EDS, no MEV, foram obtidas morfologias e análise quantitativa por linha, conforme Figura 3, que mostra estes resultados para a condição 1. A Figura 3 (a) mostra o espectro compreendendo as 3 regiões, substrato, liga intermediária e revestimento. Já a Figura 3 (b) mostra os resultados obtidos, ou seja, a presença dos elementos químicos em cada região. A Figura 3 mostra que o substrato possui praticamente somente Fe em sua composição, como esperado. A liga intermediária apresenta em sua grande maioria Ni, em segundo Al e poucas concentrações de W, Cr, C, Si, Mn, Fe e Co. O revestimento possui altas concentrações de Fe e Cr, além de baixas concentrações de Si, Mn e C.

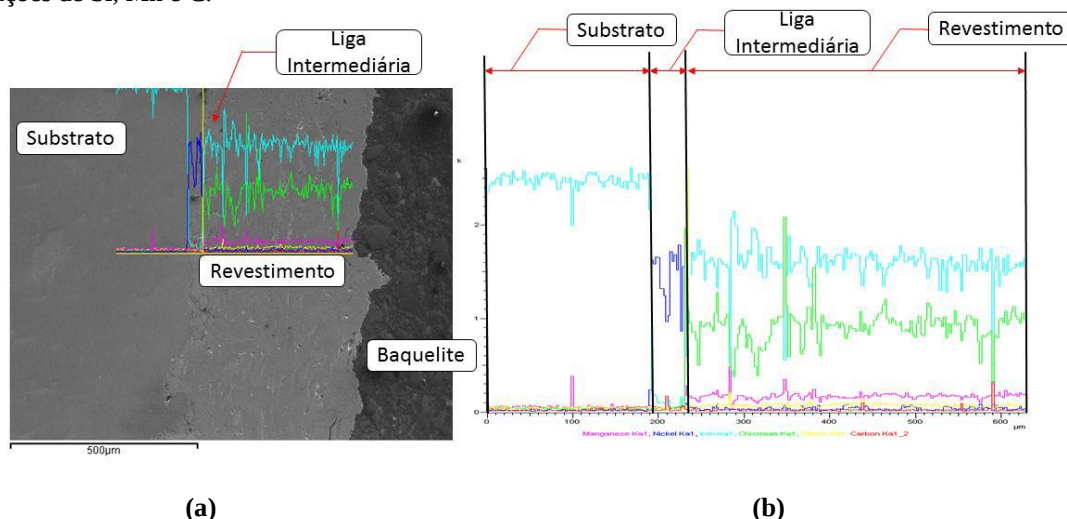


Figura 3. (a) Morfologia da amostra de condição 1. (b) Microanálise quantitativa, por linha, com o respectivo espectro de EDS dos elementos de liga na amostra de condição 1.

A Figura 4 mostra o espectro de EDS por ponto, obtido para a análise da condição 1. A Figura 4(a) mostra a posição do espectro, enquanto que a Figura 4(b) mostra os principais elementos químicos encontrados. De acordo com o com o resultado observa-se em sua grande maioria concentrações de Fe e Cr, sendo condizente com os resultados apresentados no espectro de EDS por linha.

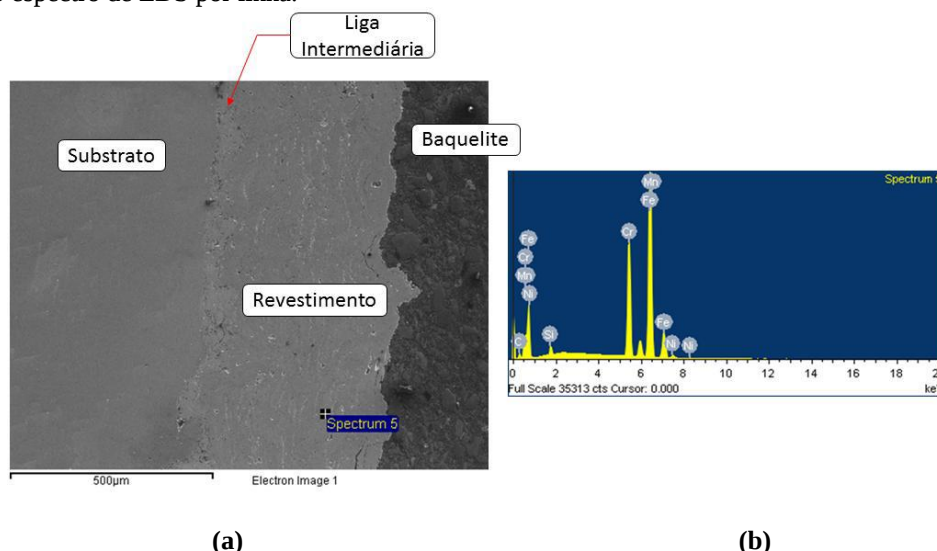


Figura 4. (a) Morfologia da amostra de condição 1. (b) Microanálise quantitativa, por ponto, com o respectivo espectro de EDS dos elementos de liga na amostra de condição 1.

A Figura 5 representa o espectro de EDS por linha obtido para a condição 2, enquanto que a Figura 6 mostra o espectro por ponto do revestimento. Como os substratos utilizados são os mesmos para ambas as condições, bem como a liga intermediária, os resultados por linha são bem semelhantes para ambas as condições, com exceção do revestimento. O espectro por ponto mostra em sua grande maioria concentrações de Cr, Fe e Co, estando de acordo com os resultados esperados para esta condição.

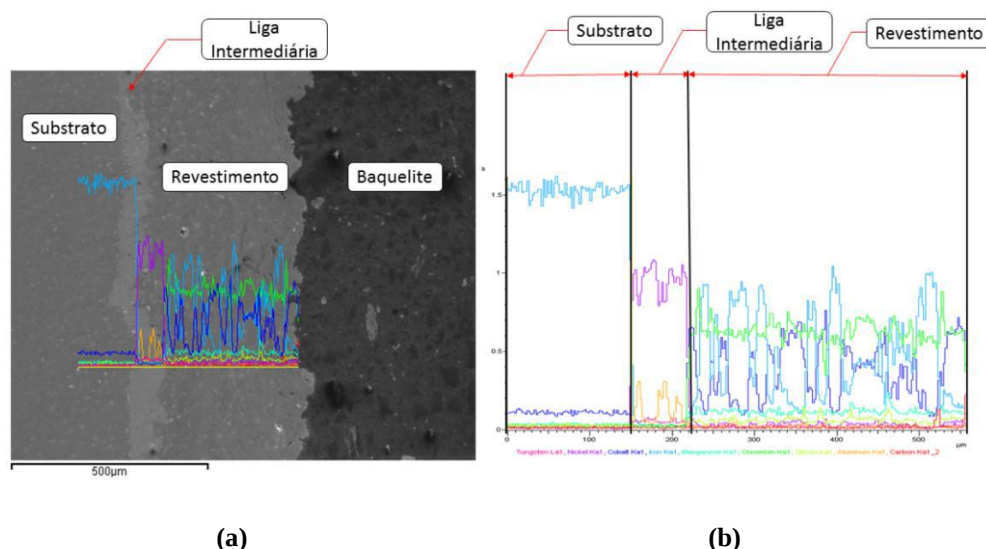


Figura 5. (a) Morfologia da amostra de condição 2. (b) Microanálise quantitativa, por linha, com o respectivo espectro de EDS dos elementos de liga na amostra de condição 2.

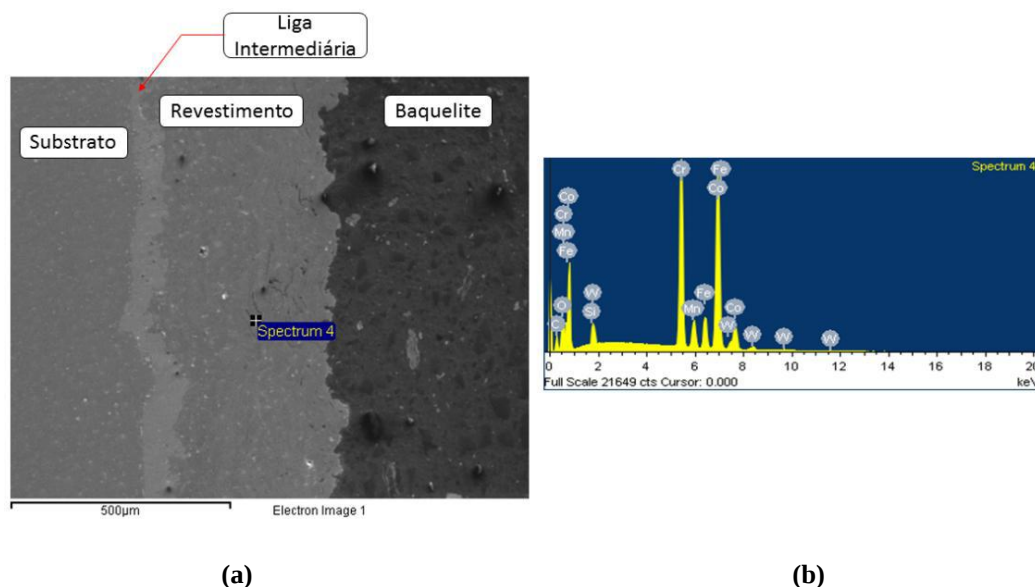


Figura 6. (a) Morfologia da amostra de condição 2. (b) Microanálise quantitativa, por ponto, com o respectivo espectro de EDS dos elementos de liga na amostra de condição 2.

As ligas a base de Níquel, quando combinadas ao Cromo e ao Cobalto são comumente utilizadas no controle à corrosão, pois conferem alta resistência à corrosão eletroquímica e à corrosão química em atmosferas oxidantes. Quando combinadas ao Alumínio, possuem propriedades adesivas e costumam ser usadas como camada de ligação (Brito, 2010). Devido a isto, muitos revestimentos contêm Cr e Co em sua composição, já que a muitos dos materiais revestidos por aspersão térmica são expostos em ambientes salinos, e o fato da liga intermediária conter Alumínio devido à alta capacidade de aderência com as ligas que compõem o revestimento. Além disso, o Níquel, em quantidades suficientes, estabiliza as estruturas austeníticas, fornecendo melhorias nas propriedades mecânicas e nos processos de fabricação (Freitas, 2015). O Ferro é utilizado geralmente em ligas a base de Níquel, pois confere aos materiais estabilidade química em altas temperaturas, boas propriedades mecânicas (principalmente dureza), baixo custo e excelente resistência à corrosão em atmosferas oxidantes e sulfetantes e boa soldabilidade (Canarim, 2013).

Para a análise de PDI, foram obtidos percentuais de 3,59% e 3,81% para as condições 1 (Fe-Cr) e 2 (Fe-Co), respectivamente. Para a condição 1, o maior valor foi de 5,43% e o menor, 2,66%. Já para a condição 2, estes valores foram de 5,27% e 2,84%. A Figura 7 mostra a distribuição dos resultados, feita a partir do processamento de 10 imagens. A diferença percentual encontrada, aproximadamente 0,22, é insignificante, uma vez que diversos fatores externos determinam o resultado final. Estes fatores são diversos, como luminosidade da tela, interpretação do executor da análise, erros atribuídos ao processamento, dentre outros.

Assim como a média de porosidade, o desvio padrão de ambas as condições também apresentou valores muito próximos, com uma diferença de aproximadamente 0,068. A condição 1 apresentou desvio padrão igual a 0,79, enquanto que a condição 2 apresentou desvio padrão de 0,72. Portanto, o mesmo se aplica neste caso, em que a diferença encontrada é ínfima e, portanto, desconsiderada.

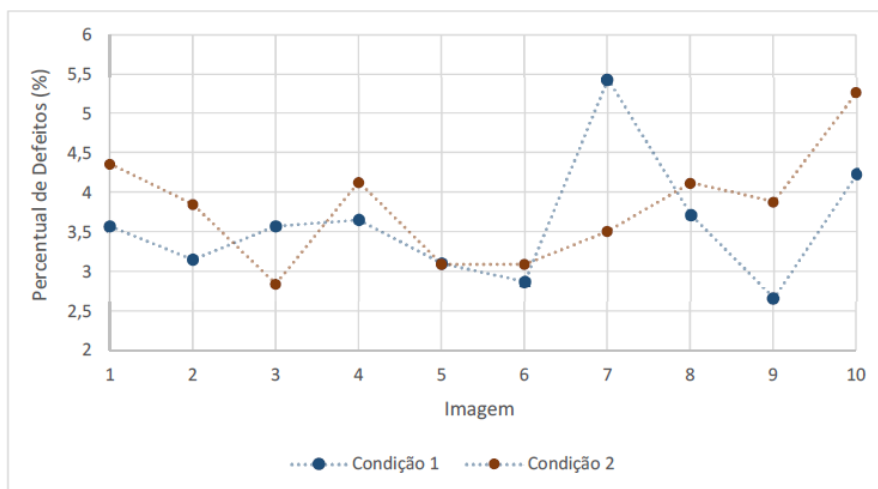


Figura 7. Gráfico de dispersão dos resultados das condições 1 e 2.

No ensaio de aderência (pull-off), ambas as condições apresentaram fraturas bastante semelhantes, inclusive em resistência à tração de adesão. Os valores para as tensões obtidas estão demonstrados na Tabela 4, e a Tabela 5 descreve os tipos de falha de um ensaio de aderência.

Tabela 4. Resultado do Ensaio de Aderência.

Condição	Ensaio	Tensão (MPa)	Modo de Falha
1	1	27,8	B e Z
	2	29,7	B e Z
2	1	26,4	Z
	2	24,9	B e Z

Tabela 5. Descrição dos tipos de falha resultantes do ensaio de Pull-off (Antunes, 2013)

Tipo de falha	Descrição
A	Falha de aderência entre o revestimento e o substrato.
B	Falha de coesão no interior do revestimento.
C	Falha de aderência entre demão.
Z	Falha de aderência entre o adesivo e o revestimento.
Y	Falha de aderência entre o carretel e o adesivo.

O valor recomendado pela Norma PETROBRAS N-2568 é de 10 MPa para revestimentos de aço inoxidável (PETROBRAS, 2011). Sendo assim, os valores obtidos neste trabalho foram elevados, mostrando bons resultados de aderência dos revestimentos.

As Figuras 8 e 9 mostram as amostras após o ensaio de pull-off, possibilitando a visualização do tipo de falha e da quantidade de material retirado.

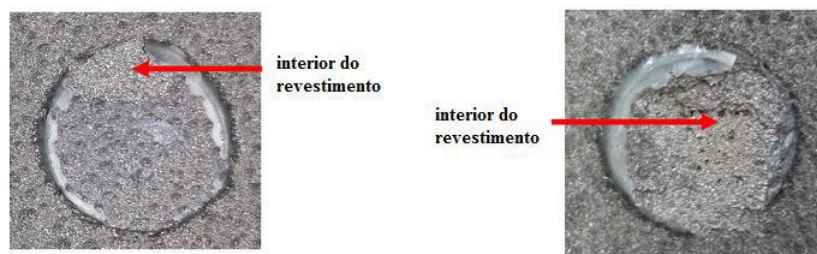


Figura 8. Resultado do teste de pull-off para a condição 1.



Figura 9. Resultado do teste de pull-off para a condição 2.

4. CONCLUSÃO

As micrografias obtidas mostraram homogeneidade e estrutura lamelar dos revestimentos, com baixo percentual de defeitos. Os ensaios de EDS realizados através do Microscópio Eletrônico de Varredura mostraram resultados esperados, com os respectivos elementos químicos de cada arame que originou cada condição.

Os resultados de Processamento Digital de Imagem mostraram semelhança entre as condições 1 e 2, com uma diferença de 0,22 entre os percentuais médios de ambas as condições. A diferença encontrada pode ser meramente oriunda de erros inerentes ao processamento de imagem. Apesar disto, a condição 2 apresentou percentual de defeitos inferior ao da condição 1, sendo os valores iguais a 3,59% e 3,81%, respectivamente.

Para o ensaio de aderência os resultados também foram semelhantes, com resistência à tração de adesão média global de 26,82 MPa. O ensaio de aderência forneceu resultados extremamente satisfatório, bem superiores ao exigido na norma de referência, 10 MPa.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à VGK Engenharia pelo apoio e fornecimento das amostras utilizadas.

6. REFERÊNCIAS

- Antunes, F. J., Brito, V. R. S. Sá, Costa, H. R. M., Bastos, I. N., de Campos, J. B., de Aguiar, R. A. A., 2014, "Correlation Between Chemical Composition and Adherence of Cr and Co Coatings Deposited by Electric Arc", The Journal of Adhesion.
- Ghafouri-Azar, R., Mostaghimi, J., Chandra, S., 2006. "Modeling development of residual stresses in thermal spray coatings", Science Direct, Vol. 35, pp. 13-26.
- Zaat, J. H., 1983, "A quarter of a century of plasma spraying", Annual Reviews, Vol.13, pp. 9-42.
- Pershin, V., Lufitha, M., Chandra, S., Mostaghimi, J., 2002, "Effect of Substrate Temperature on Adhesion Strength of Plasma-Sprayed Nickel Coatings". Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 12, pp. 370-376.
- Paredes, R. S. C., 2012, "Aspersão Térmica", Curitiba.
- Freitas, B. C., 2015, "Estudo das propriedades microestruturais de ligas de níquel-cromo e cobalto-cromo obtidas pelo processo de metalização a arco elétrico", Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro.
- McPherson, R., 1989, "A Review of Microstructure and Properties of Plasma Sprayed Ceramic Coatings", Surface and Coatings Technology, Volumes 30-40, pp. 173-181.
- Brito, V. S. S., 2010, "Caracterização de Revestimentos Metálicos Aspergidos Termicamente por Arco Elétrico", Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro.
- Lira, L. P., 2012, "Avaliação da resistência ao desgaste e à corrosão de revestimentos aspergidos termicamente em liga de alumínio AA 7475", Dissertação de Mestrado, São Carlos.

ANALYSIS OF MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF NICKEL COATINGS OBTAINED BY THERMAL SPRAY

CON-2016-0529

Abstract. *This research has the purpose of evaluating Fe-Cr-Ni and Co-Cr-Ni metal coatings, obtained by thermal spraying process electric arc in a carbon steel substrate. It was used three different wires, A (Fe-Cr), B (Fe-Cr-Ni) and C (Co-Cr-Ni). These combinations provided two conditions, one made through conventional alloy, composed mostly by chromium and nickel, and the other is an alloy with superior mechanical properties, which contains mostly cobalt and chromium. Initially, a microstructural assessment was carried out by Optical Microscopy and Scanning Electron Microscopy (S.E.M) and Optical Microscopy (OM). In addition, Digital Image Processing (DIP) was held using the FIJI Image software. The aim was to evaluate the porosity, oxide and microcrack percentages, mainly seeking voids in a determined sample area. It was also performed a pull-off test, in order to evaluate the adherence of the coatings. The results obtained by SEM and OM showed uniformity in the deposited layer. The amount of defects (porosity, oxides and microcracks) obtained by DIP was 3,59% for condition 1 and 3,81% for condition 2. Regarding the adherence test, the average stress was 26,82 MPa, fulfilling the required minimum required stress (10MPa).*

Keywords: *Thermal Sprayed, Metallic coatings.*