

Avaliação da Resistência a Corrosão de Revestimentos Metálicos Depositados por Aspersão Térmica a Arco: uma Aplicação em Trocadores de Calor

(Evaluation of Resistance to Corrosion of Metallic Coatings Deposited Thermal Spraying by Arc: an Application in Heat Exchangers)

Rodrigo Cardoso Costa^{1,2}, Michel Volpato Dacoreggio², Norton Zanette Kejelin³, Franco Wronski Comeli^{1,3}

¹Universidade federal do Rio Grande do Sul, LDTM, Porto Alegre-RS, Brasil

²Faculdade SATC, Engenharia Mecânica, Criciúma-SC, Brasil

³Empresa Tractebel Energia, Manutenção UTLB, Capivari de Baixo-SC, Brasil

rodrigo.costa@satc.edu.br¹

Resumo

Tubos de trocadores de calor de usinas termoelétricas a carvão sofrem desgaste corrosivo devido à presença de enxofre e condensação dos gases da combustão, tendo por consequência uma redução na eficiência global do equipamento. Uma opção para o aumento da resistência à corrosão em meios agressivos é a utilização de revestimentos aplicados pela tecnologia de aspersão térmica. A resistência à corrosão dá-se com o emprego de materiais mais resistentes que o substrato. Dentre os processos existentes de aspersão térmica, o que utiliza o arco elétrico como fonte de energia (Arc Spray), possui alta taxa de deposição e menor custo operacional, sendo assim, escolhido para o estudo. Para a determinação do melhor revestimento a ser utilizado, foram testadas ligas metálicas resistentes à corrosão, em comparação com o material empregado nos tubos dos trocadores de calor, ASTM 178A. A seleção do revestimento mais resistente foi feita por meio de ensaio de corrosão acelerada em câmara de SO₂ e também através do ensaio de polarização. Verificou-se que o revestimento de alumínio apresentou os melhores resultados nos testes realizados, quando comparados com material utilizado atualmente nos trocadores de calor (ASTM 178A).

Palavras-chave: Carvão. Desgaste Corrosivo. Revestimento. Alumínio.

Abstract: *Heat exchangers pipes for thermal power plants to coal suffer wear corrosive due to the presence of sulfur and condensation of combustion gases, which results in a reduction in overall equipment efficiency. A choice for increasing the corrosion resistance in corrosive environments is the use of coatings applied by thermal spray technology. The corrosion resistance occurs to the use of materials stronger than the substrate. the processes are thermal spray, which uses the electric arc as a source of energy (Arc Spray) has a high deposition rate and low operating costs, so chosen for the study. For the determination of the coating to be used, corrosion-resistant alloys were tested in comparison with material employed in the pipes of heat exchangers, ASTM 178A. The selection of the most resistant coating was made by means of accelerated corrosion test in SO₂ chamber and also by testing polarization. It was found that the aluminum coating had the best results in the tests when compared with materials currently used in the heat exchangers (ASTM 178A).*

Key-words: Coal. Corrosive wear. Coating. Aluminum.

1. Introdução

O histórico de manutenção dos aquecedores tubulares do tipo recuperativo de fluxo cruzado, do Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda (CTJL), relatam constantes paradas por conta da corrosão dos tubos. A corrosão se deve à natureza do carvão utilizado, uma vez que o tipo empregado possui elevado teor de enxofre em sua composição. Os compostos de enxofre quando dissociados com a queima do carvão resultam numa elevada formação de gases SO₂. [10]

O problema se agrava com a condensação dos vapores d'água sobre a superfície dos tubos, pois estes sofrem ininterruptos ataques de compostos químicos altamente corrosivos, os quais estão contidos no condensado, como o ácido sulfúrico (H₂SO₄). Este desgaste químico avança até que os tubos sejam furados, ou mesmo desconectando-os do sistema (falha total). Os gestores da usina termoelétrica entendem que, o problema da corrosão dos tubos tem influência direta, na queda de eficiência da planta geradora de energia elétrica. [7, 10]

A corrosão pode ser definida como a deterioração de um corpo sólido, por meio de ação química ou eletroquímica provocada pelo meio ambiente ou agente agressor. Estima-se que uma parcela superior a 30% do aço produzido no mundo seja usada para reposição de peças e partes de equipamentos, ou ainda instalações deterioradas pela corrosão. [13]

Recebido em 10/03/2014, texto final em 25/08/2014.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI1904.02>

Nos últimos anos revestimentos depositados por aspersão térmica, têm sido amplamente aplicados, com o objetivo de atuar na proteção contra os mecanismos de desgaste corrosivo. Fatores como porosidade e oxidação da camada aspergida são determinantes no desempenho do revestimento, para a finalidade que estes estão sendo aplicados. [5, 19]

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento de revestimentos depositados por *Arc Spray*, frente ao desgaste corrosivo provocados por enxofre. As blindagens superficiais propostas, indicaram um tipo de material capaz de minimizar ou bloquear a evolução da corrosão nos substratos em ASTM 178A.

2. Caracterização do Problema

O fenômeno da corrosão envolve a interação entre um substrato, geralmente metálico, e um meio, do qual decorrem alterações indesejáveis no material, tais como: redução de propriedades mecânicas, precisão dimensional e desgaste. Em trocadores de calor, tem-se ainda, redução na eficiência térmica, decorrente da baixa condutividade dos óxidos superficiais formados. [1]

A corrosão, nesse caso, ocorre devido à elevada troca térmica na zona de exaustão de gases quentes e entrada de ar frio. O ar quente atinge o ponto de orvalho, seguido da condensação do vapor d'água. Sendo a corrosão mais acentuada na extremidade fria do trocador de calor em função da temperatura dos tubos, e do teor de enxofre do carvão. Quando o ar frio no interior da tubulação entra no sistema, inicia-se a troca de calor com os gases de combustão contendo enxofre. Nesse estágio, os gases de combustão atingem a temperatura de orvalho (aproximadamente 115°C), possibilitando a formação de ácido sulfúrico, a partir do SO₂ presente nos gases de combustão, aproximadamente 25 Kg/MW, estes reagem com moléculas de água presentes no ambiente. [7]

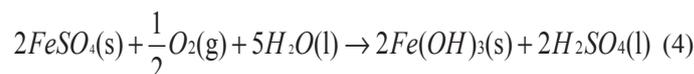
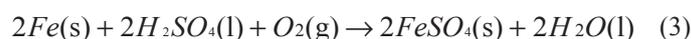
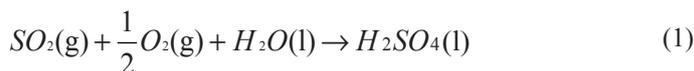
A Figura 1 apresenta uma imagem da parede interna do trocador de calor. Nela observa-se a formação de incrustações e perfuração nos tubos, fatores que contribuem com a perda de eficiência do equipamento.



Figura 1. Tubos do aquecedor tubular UTLB Banco D. [7]

As reações de corrosão que ocorrem no trocador são descritas abaixo. Na Equação 1 o dióxido de enxofre em contato com oxigênio e a água forma ácido sulfúrico, composto que é altamente corrosivo; na Equação 2 ocorre a formação do sulfeto de enxofre, devido à reação do ferro presente nos tubos do trocador e o dióxido de enxofre presente nos gases de combustão.

Na Equação 3 o ferro dos tubos em contato com ácido sulfúrico e oxigênio, gera novamente o sulfato de ferro. Já na Equação 4 o sulfeto de ferro em contato com a água reage e forma o ácido sulfúrico. Pode-se notar que sulfato de ferro, ao sofrer hidrólise, forma ácido sulfúrico. Isso torna a reação de corrosão cíclica, o que acelera o processo de corrosão. Porém, a presença de H₂SO₄ na forma de vapor (SO_{2(g)} + H₂O_(v)) não ocasiona corrosão, somente quando ocorre à condensação dos gases. [9, 13]



Os tubos quando furados são submetidos a um reparo ou isolamento, como por exemplo o tamponamento. Isso acarrete numa obstrução do fluxo de ar, o que faz reduzir a eficiência de troca térmica por consequência. Pode-se utilizar de artifício até certo ponto, pois caso se tenha muitos tubos obstruídos, a equipe de manutenção é forçada a realizar a troca dos tubos para garantir a potência contratada, aumentando o custo de manutenção do equipamento. [13]

2.2 Desgaste Corrosivo

A corrosão pode ser definida como uma reação química ou eletroquímica, entre um material e um meio, que produz a deterioração do material e de suas propriedades. Para metais puros e suas ligas, esta reação é decorrente da tendência natural ou espontânea que esses materiais possuem em retornar para a forma de minerais termodinamicamente mais estáveis. [1, 14]

A corrosão é o aumento na velocidade de ataque do metal devido ao movimento relativo entre um fluido corrosivo e a superfície metálica. Na corrosão, os produtos sólidos que formam sobre a superfície são arrastados e/ou o metal é removido como íons. Frequentemente, a película sobre a superfície metálica é removida devido à ação abrasiva de fluidos (ou gases) movendo-se rapidamente, tal ação pode facilmente levar ao aparecimento de pequenas regiões anódicas em contato com grandes regiões catódicas, o que constitui uma situação especialmente perigosa. [21]

A importância dos problemas de corrosão decorre de dois aspectos principais. O primeiro, econômico, em razão do seu elevado custo. No Brasil, segundo dados de 2006, o custo anual decorrente da corrosão foi de aproximadamente 40 bilhões de reais. O segundo aspecto está correlacionado com a preservação das reservas minerais, faz-se a necessidade de produção adicional por conta da reposição do que é deteriorado. [8]

Através da Figura 2 pode-se observar que as reações eletroquímicas que ocorrem em uma célula de corrosão, onde se produz tanto um fluxo de elétrons quanto migração de espécies

químicas através do eletrólito. Para que haja uma célula eletroquímica, quatro processos ocorrem simultaneamente: 1) Oxidação na superfície do ânodo; 2) Redução na superfície do cátodo; 3) Fluxo de elétrons entre eles através de uma conexão metálica; 4) Fluxo de íons através de um eletrólito. [17]

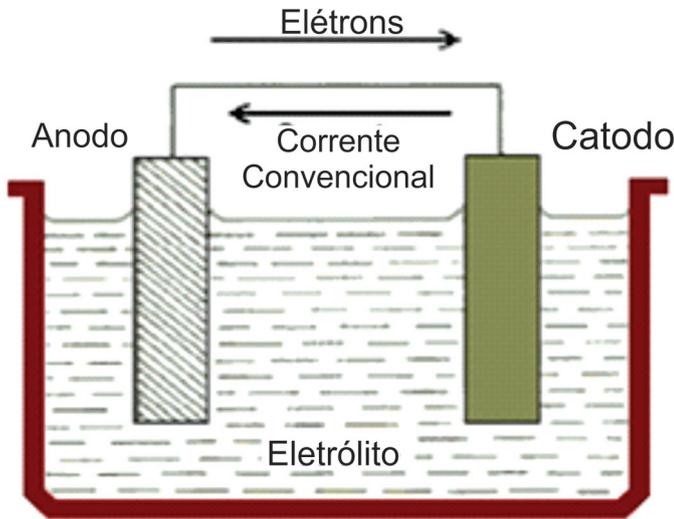


Figura 2. Pilha de eletrodos diferentes. [17]

Um fator importante para a determinação da velocidade de corrosão é a passivação ou não do material. A passivação sugere a combinação do metal com o oxigênio, formando uma camada superficial fina de óxido protetor, tornando esta superfície mais estável ao meio. O filme passivo separa o metal do eletrólito e por consequência a velocidade de corrosão é reduzida significativamente. A curva de polarização de um metal comporta-se de três maneiras conforme Figura 3. [11]

A Figura 3a apresenta ativação do material a partir do potencial de corrosão (E_c) e, passivação a partir da corrente crítica (I_{corr}). Na Figura 3b observa-se uma curva de polarização

onde desde o potencial de polarização (E_p) tem-se a passivação do metal. Na Figura 3a e Figura 3b após certo potencial ocorre o rompimento do filme passivo pela formação de pites. Já a Figura 3c mostra uma curva semelhante à curva da Figura 3a, porém a passivação ocorre até potenciais mais elevados, fator que dificulta a formação de pites no filme passivo e, consequentemente aumenta a resistência à corrosão do material. [12]

Um dos materiais que apresenta potencial para passivação é o alumínio, que neste estudo por ser depositado pelo processo de aspersão térmica, apresenta grande quantidade de óxidos. Sendo assim a proteção contra a corrosão é beneficiada pela presença de óxidos embutidos na camada e formados na superfície da camada. [15]

Ao comparar o potencial de corrosão do aço com o potencial de corrosão do alumínio, verifica-se que o aço é mais nobre que o alumínio. Isto significa que ao colocar estes dois materiais em contato, o alumínio pode proteger o aço pelo processo de proteção catódica, onde o alumínio pode se comportar como um anodo de sacrifício, protegendo o aço. [18]

Pode-se também relacionar a ação corrosiva com o pH, umidade relativa, temperatura do meio corrosivo, entre outros fatores. Em regiões ácidas, com pH menor que 4, o aumento da corrosão deve-se a possibilidade de redução do H^+ além do O_2 presente no meio. Nestes ambientes a difusão de O_2 , responsável pela velocidade da reação de corrosão, facilita o desprendimento do hidrogênio. [13]

O efeito do pH pode ser verificado na Figura 4a, que demonstra a taxa de corrosão do ferro em função do pH. Outro fator importante para a ocorrência da corrosão no trocador pode ser atribuído a expressiva quantidade de água que é formada durante a queima do carvão. Em uma hora são formadas aproximadamente 13 toneladas de vapor d'água, provenientes da combustão do carvão. A umidade relativa dos gases fica em torno de 6% e sua temperatura em 160 °C. [20]

Na Figura 4b, observa-se a interação entre os poluentes da

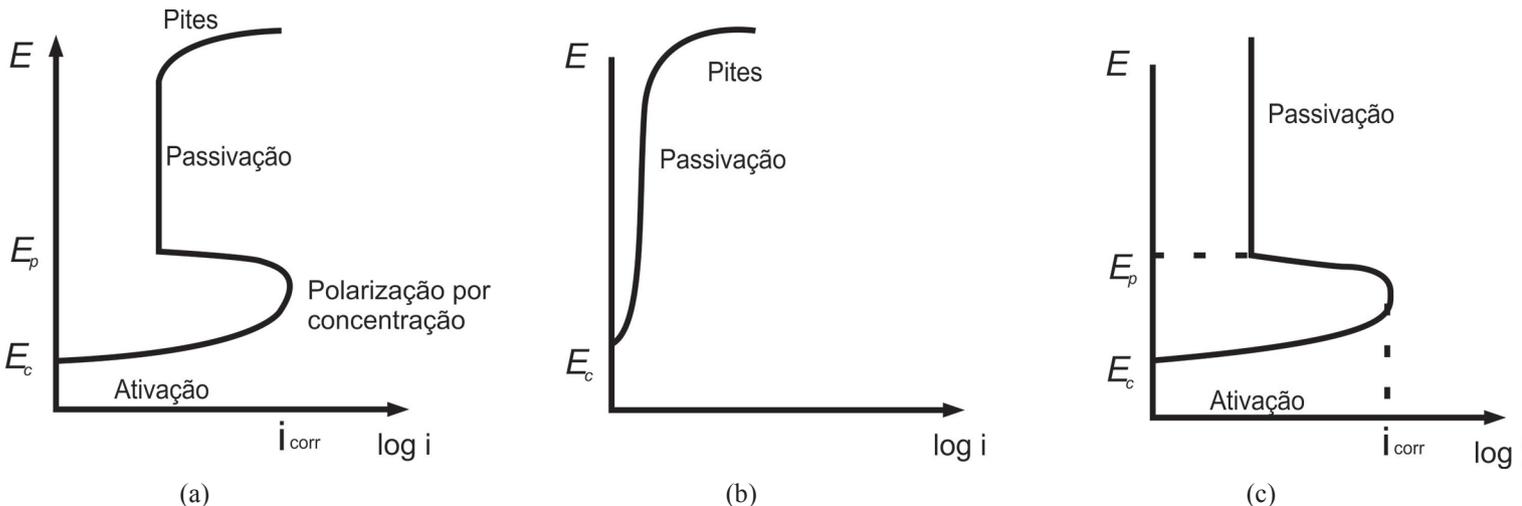


Figura 3. Curvas de polarização clássicas. [12]

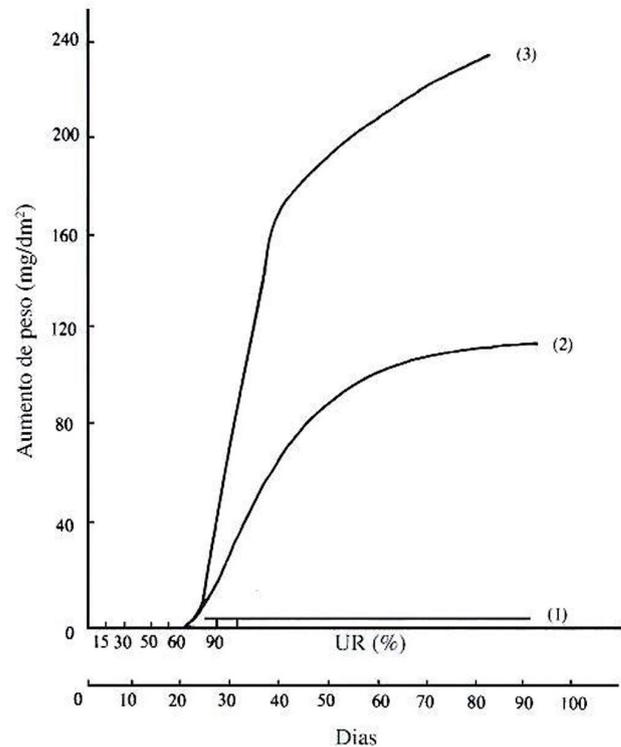
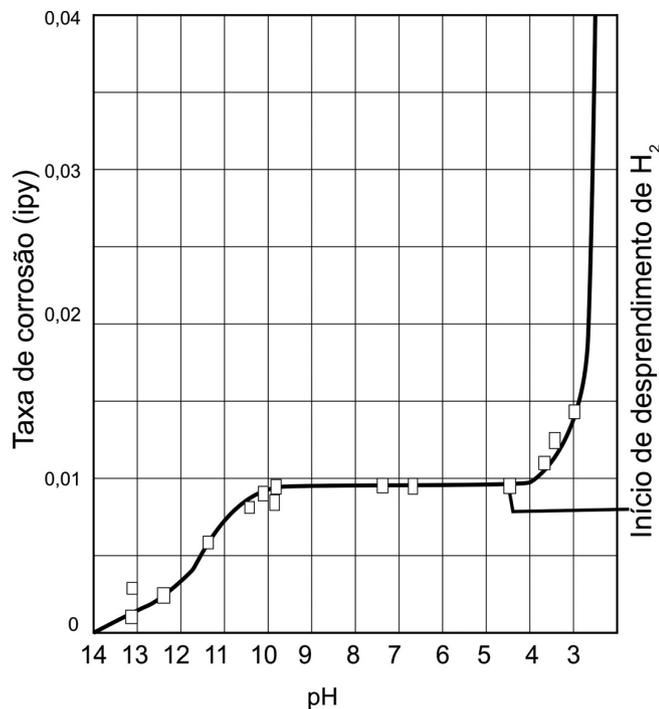


Figura 4. Influência do ambiente na taxa de corrosão: (a) Efeito do pH na taxa de corrosão do ferro. (b) Curvas de influência do dióxido de enxofre na taxa de corrosão dos materiais. [20]

atmosfera e umidade na taxa de corrosão, onde: (1) curvas de influência da presença de carvão na atmosfera; (2) presença de dióxido de enxofre na atmosfera e, (3) ação conjunta do carvão e dióxido de enxofre na atmosfera. Fica evidente a relação entre a umidade relativa e massa perdida pela corrosão. Também nota-se que a ação de carvão, juntamente com o enxofre, em ambientes com umidade relativa alta, intensifica a taxa de corrosão do material. [20]

3. Procedimento Metodológico

Serão apresentados os procedimentos utilizados para a realização deste trabalho, entre eles estão a preparação dos corpos de prova, os materiais empregados, ensaios de desgaste corrosivo, dentre outros.

3.1 Preparação dos Corpos de Prova

Para a fabricação das amostras que serão submetidas aos ensaios de corrosão acelerada em câmara de SO_2 , a melhor alternativa foi o pré-corte do tubo antes do processo de metalização. A amostra final apresenta dimensões finais de $\text{Ø } 57,15 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, com isolamento interno em resina polimérica, deixando somente a superfície aspergida exposta ao meio corrosivo.

As amostras para o ensaio de polarização foram confeccionadas de seções dos tubos com comprimento e largura de 40 mm e espessura de 3 mm. As amostras que serão utilizadas no ensaio de dobramento são seções do tubo com cerca de 20 mm de largura, 200 mm de comprimento e espessura de 3 mm. Já as

amostras para ensaios metalográficos são seções do tubo com dimensões de 10 mm de largura, 40 mm de comprimento e espessura de 3 mm.

Para a preparação superficial de cada substrato (corpo de prova) foi utilizado jateamento com óxido de alumínio marrom angular de 24 mesh. Esse procedimento tem o objetivo de remover mecanicamente toda as impurezas da superfície, bem como produzir uma textura que proporcione um melhor ancoramento do revestimento ao substrato. As rugosidades médias superficiais das texturas foram de aproximadamente 6,0 Ra, valor recomendado pela norma Petrobras N-2568.

3.2 Aplicação dos Revestimentos Metálicos

Os revestimentos foram depositados por um equipamento de aspersão térmica a arco *Eutronic ARC SPRAY 4* da marca EUTECTIC. As aplicações dos revestimentos foram feitas no LAENS (Laboratório de Engenharia de Soldagem e Aspersão Térmica), da Faculdade SATC.

Para obtenção de revestimentos que garantam proteção contra corrosão, foram realizados testes de aspersão com o intuito de definir o melhor pacote de ajuste operacionais para cada revestimento selecionado. Avaliou-se inicialmente os parâmetros da distância entre tocha e peça, potência do arco elétrico e pressão de atomização do material. Nessa etapa foi observado a boa formação da pluma de aspersão e a microestrutura de cada revestimento. Os melhores parâmetros operacionais para cada material estão dispostos na Tabela 1, e estes foram ajustados na metalização dos corpos de prova.

Tabela 1. Parâmetros utilizados para a metalização dos corpos de prova.

Nº Amostra	Material Depositado	Parâmetros operacionais					
		U (v)	I (A)	P (bar)	D (mm) ¹	Vdt (mm/min) ²	Rt. (rpm) ³
1	AISI 308	28	100	2,5	120	1074	226
2	Inconel 625	27	100	2,5	120	1074	226
3	AISI 316	30	160	2,5	120	1074	226
4	Alumínio	27	140	2,5	120	1074	226
5	AISI 420	24	100	4,0	120	1074	226

Nota: ¹Distância entre bocal da tocha e tudo. ²Velocidade de deslocamento da tocha. ³Rotação do tubo.

3.3 Ensaio de Corrosão Acelerada em Câmara de SO₂

Visando a simular as condições operacionais dos trocadores de calor, foram realizados ensaios de corrosão acelerada em câmara de SO₂ nas dependências do SENAI/SC de Criciúma. Foram utilizados corpos de prova provenientes de tubos ASTM 178A seccionados em comprimento de 96 mm, diâmetro de 57 mm e espessura de 3 mm. Durante os ensaios, os corpos de prova foram submetidos a 8 horas ininterruptas em contato direto com o gás SO₂, e, posteriormente, a um ambiente com umidade relativa elevada e com temperatura de 40 ± 3 °C durante 16 horas, completando assim as 24 horas de um ciclo.

O equipamento (câmara) no qual foi realizado o ensaio atende a norma ASTM G87-02 *Standard Practice for Conducting Moist SO₂ Tests*. Foi empregada uma vazão de SO₂ de 2 litros por ciclo. Foram realizadas medições de massa nos corpos de prova nos intervalos entre cada ciclo de 24 horas, num total de 03 ciclos ou 72 horas de ensaio. Durante a realização dos ensaios as amostras foram posicionadas sobre placas de material cerâmico.

3.4 Ensaio de Polarização

Embora o ensaio de corrosão acelerada em câmara de SO₂ forneça informações importantes acerca do comportamento dos materiais analisados frente a uma condição real, foram realizados ensaios de polarização para que se pudesse obter um melhor prognóstico que justifique a utilização desses revestimentos em virtude das suas inerentes capacidades de passivação.

O ensaio de polarização consiste em variar linearmente o potencial aplicado ao eletrodo de trabalho (a própria amostra), tendo como resposta a corrente que circula entre os eletrodos. Esse ensaio é utilizado para se conhecer o comportamento de corrosão dos materiais aspergidos, permitindo obter informações referentes ao potencial de corrosão (E_{corr}) e corrente de corrosão (I_{corr}) de cada material analisado.

Este método consiste em traçar duas retas tangentes às curvas de polarização, uma no ramo catódico (inferior) e outra no ramo anódico (superior). Na intersecção das duas retas são determinados os valores de potencial e corrente de corrosão.

Durante o ensaio, executado no LACOR/UFRGS conforme a norma ASTM G5-04, as amostras foram colocadas em uma célula eletrolítica de 3 eletrodos especialmente concebida para curvas de polarização (célula de trabalho) com área de amostra exposta de 0,63 cm² em região da amostra distante das bordas, e

potencial variando entre -1V a 1,7 V. Como eletrodo de referência, foi utilizado o eletrodo de Ag/AgCl e como contra eletrodo um fio de platina. Todas as análises foram realizadas em solução de H₂SO₄ 1M e a temperatura ambiente.

Após a realização dos ensaios, as amostras foram retiradas para análise e os dados foram tratados com o uso do *software Origin 8* e *GPES Manager*, para obtenção dos gráficos e valores necessários.

3.5 Ensaio de dobramento

A necessidade de boa adesão da camada aspergida sob o substrato constitui um importante ponto de partida, para eventuais instalações dos tubos revestidos nos trocadores de calor, uma vez que os mesmos são fixados ao espelho por meio de mandrilamento. A deformação no tubo gerada no processo de mandrilamento, pode provocar o desprendimento local do revestimento na região deformada, tornando esse ponto crítico, pois o revestimento pode falhar na proteção contra a corrosão.

Para avaliar e qualificar a adesão dos revestimentos ao substrato, esse estudo adotou o método de dobramento, conforme a norma Petrobras N-2568. Essa norma de metalização determina que as amostras devem ser dobradas à 180°, formando no centro das mesmas uma dobra de raio aproximadamente 8 mm.

Este ensaio foi executado num dispositivo que atende aos requisitos da norma N-2568, o qual foi posicionado abaixo do atuador de uma prensa manual com capacidade de 30 toneladas. Sobre a base da prensa hidráulica, a estrutura de dobra foi centralizada com o eixo do atuador, onde foi fixado o cutelo de carga, conforme visualização da Figura 5. Os cutelos de apoio rotativos foram fixados a 50 mm entre centros. As amostras metalizadas no formato de tiras foram posicionadas individualmente sobre os cutelos de apoio, de forma centralizada e alinhada com o cutelo de carga. As superfícies metalizadas durante os ensaios ficaram em contato com os cutelos de apoio. No final de todos os alinhamentos o cutelo de carga foi acionado contra o substrato, provocando a deformação em 180° da amostra, forçando o desprendimento dos revestimentos submetidos ao teste de adesão.

Após o dobramento total das amostras, as faces dos revestimentos foram analisadas na região da dobra com uma lupa, onde as características observadas foram comparadas com os critérios da norma N-2568 sobre a resistência de adesão dos revestimentos metalizados.

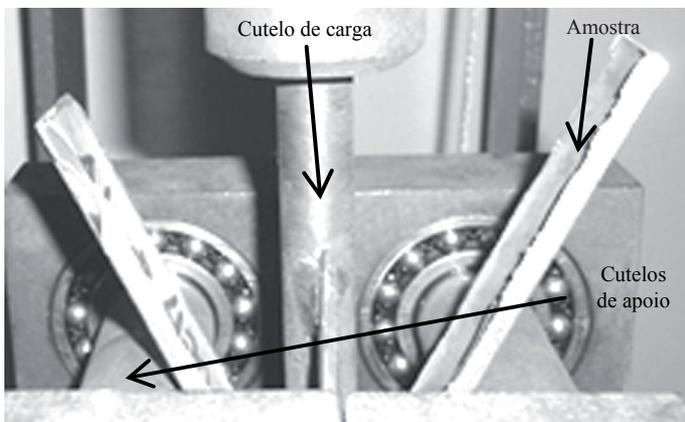


Figura 5. Estrutura para ensaio de dobramento a 180°

3.6 Análise microestrutural

Após a preparação da secção longitudinal da amostra, foram analisados os resultados das condições de aspersão térmica, num microscópio óptico digital Olympus BX51M. Com esse aparelho foi possível observar a adesão do revestimento base no substrato, bem como analisar a formação de óxidos, poros e partículas não fundidas entre as lamelas do revestimento.

Uma varredura foi efetuada na linha do revestimento metalizado para análise geral, sendo digitalizado 5 imagens ao longo da metalização. E para efetuar a medição de camada foi utilizado o *Software Image Tool*, conforme a Figura 6, e dessa forma pode-se estipular a dimensão média da camada aspergida.

Com o uso do mesmo *software* foi empregada a técnica de binarização manual, para obtenção do índice de porosidade na microestrutura aspergida. Para padronizar o contraste de cores foi adotado o *range* de binarização de 0-30, para todas as amostras. Essa técnica associa os defeitos da camada do revestimento aspergido dentro de uma área total analisada, realizando o contraste entre branco e preto, determinando as regiões pretas como sendo a porosidade da microestrutura metalizada.

4. Resultados e Análises

A seguir são apresentados os resultados obtidos no transcorrer do estudo, assim como as análises referentes as características dos materiais e ensaios.

4.1 Caracterização dos Revestimentos

4.1.1 Resultados do ensaio de dobramento a 180°

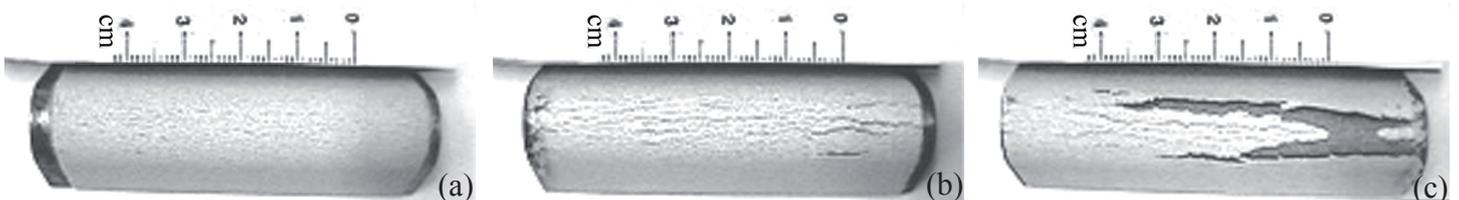


Figura 7. Característica visual dos revestimento metalizados após ensaio de dobramento 180°. (a) Característica superficial: critério ideal. (b) Característica superficial: critério marginal. (c) Característica superficial: critério rejeitada.

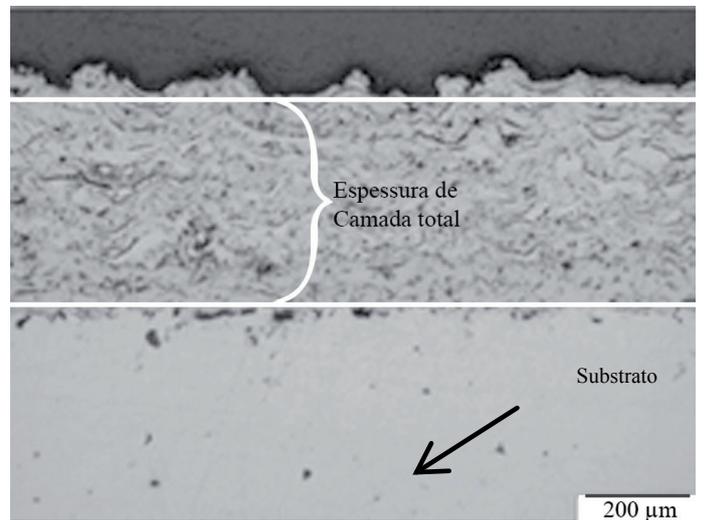


Figura 6. Imagem digital da secção transversal do revestimento.

A norma N-2568 determina que após o ensaio de dobramento, o revestimento aspergido sobre o corpo-de-prova não pode ter indícios de trincas grosseiras, e/ou deslocamento do revestimento. As amostras que apresentarem trincas finas e curtas, na região do dobramento serão classificadas como ideal pelo critério de avaliação visual. A Figura 7 apresenta o critério imposto pela norma Petrobras N-2568.

Como pode ser visualizado na Figura 8d, o revestimento de Alumínio obteve o melhor comportamento, pois nenhuma fratura e/ou deslocamento da camada metalizada foi observada na região da dobra. A trincas observadas nas demais figuras, mostram uma maior fragilização da camada aspergida por se tratar de revestimentos de maior dureza e baixo alongamento.

O revestimento de Alumínio atende ao critério de adesão ideal, por apresentar a menor formação de trincas superficiais, o que leva a interpretação que este revestimento apresenta uma maior deformação interlamelar da camada do revestimento, além de uma boa adesão ao substrato. Já a amostra revestida com AISI 316, Figura 8c, segundo a norma N-2568 foi rejeitada pelo critério de adesão, por apresentar deslocamento do substrato. E as demais amostras Figuras 8a e 8b são qualificadas conforme a norma de metalização como adesão marginal. A amostra com revestimento AISI 420 (Figura 8e) nesse estudo foi classificada como rejeitada, por apresentar muitas trincas.

4.1.2 Resultados da análise microestrutural

As metalografias dos revestimentos aspergidos podem ser observadas na Figura 9. Já os resultados das análises microestruturais de porosidade e espessura média da camada aspergida são observadas na Tabela 3.

As micrografias dos revestimentos de aços inoxidáveis AISI 308, AISI 316 e AISI 420, evidenciam a presença de porosidade entre lamelas, essas falhas estruturais permitirá a entrada e acúmulo de elementos corrosivos no revestimento, podendo este entre em contato com o substrato. A blindagem superficial do substrato com esses tipos de revestimentos, mostra-se ineficaz

na proteção contra o desgaste corrosivo. O revestimento de Alumínio apresentou uma microestrutura de alta coesão lamelar, sendo assim a baixa porosidade da camada aspergida indica uma menor probabilidade do meio corrosivo externo atingir o substrato, devido a melhor vedação da superfície do substrato.

O baixo índice de porosidade do revestimento em Alumínio (amostra 4), confirma a alta coesão lamelar observada na microestrutura desse revestimento, este ainda possui a maior espessura de camada metalizada. Isso indicada uma proteção ainda mais eficiente, devido a maior dificuldade do meio corrosivo em

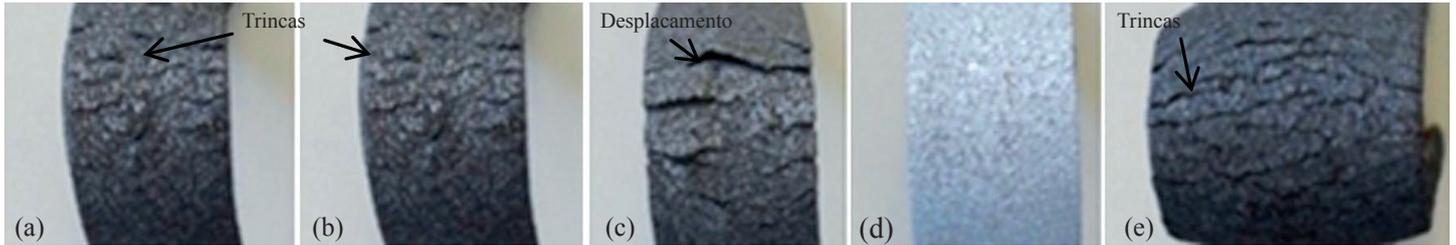


Figura 8. Comportamento dos revestimentos frente ao ensaio de dobramento: (a) AISI 308. (b) Inconel 625. (c) AISI 316. (d) Alumínio. (e) AISI 420.

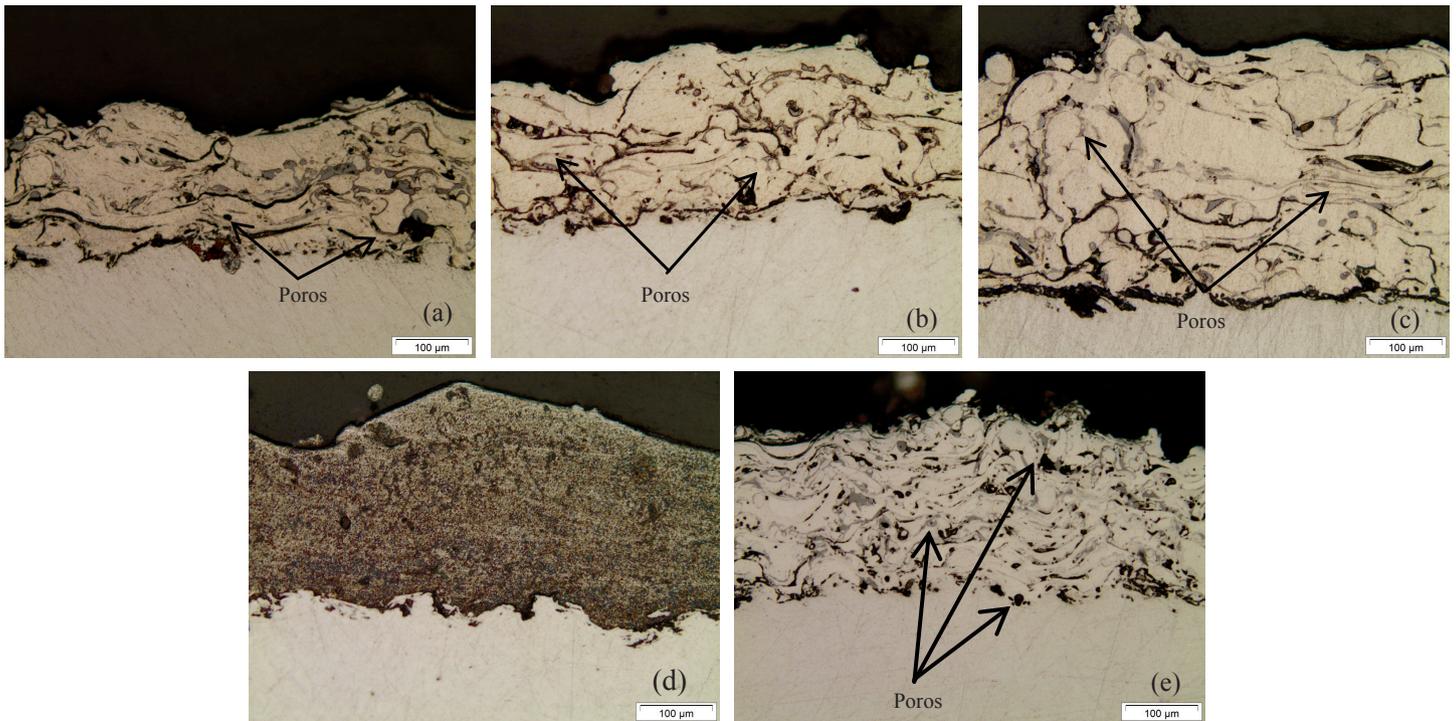


Figura 9. Metalografia das amostras selecionadas obtidas por Microscopia Óptica: (a) AISI 308. (b) Inconel 625. (c) AISI 316. (d) Alumínio. (e) AISI 420.

Tabela 3. Valores de porosidade e espessura média dos revestimentos.

Nº Amostra	Análises microestruturais	
	Porosidade (%)	Espessura de camada (µm)
1	5,02	179±26
2	4,01	174±30
3	4,01	185±20
4	0,53	211±43
5	1,29	190±36

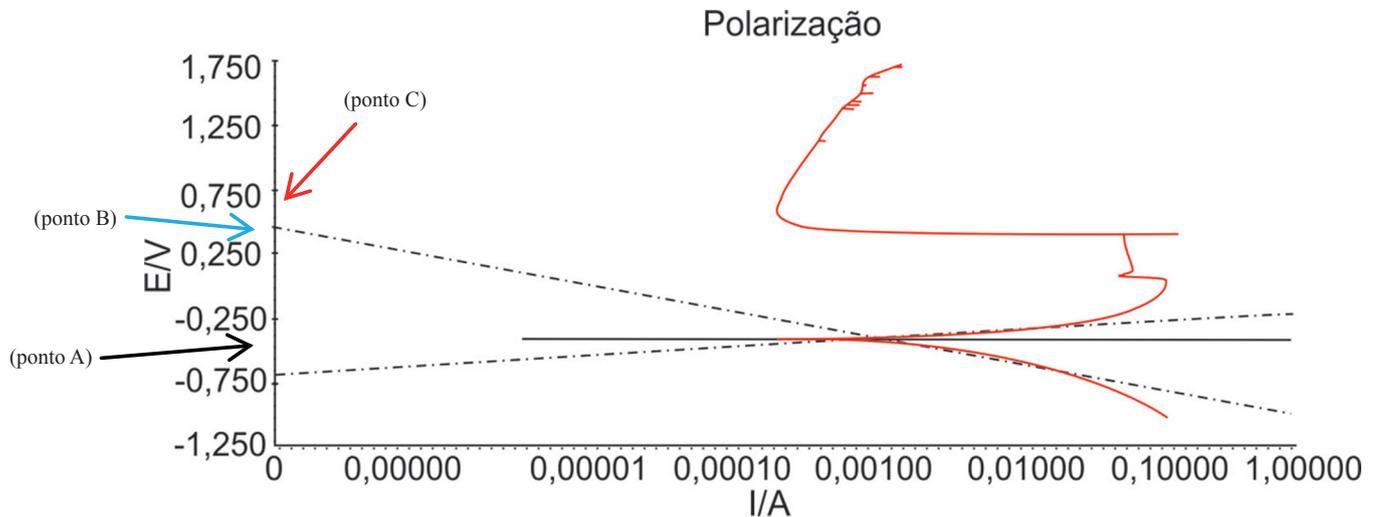


Figura 10. Curva de polarização para o aço ASTM 178A.

atingir o substrato. Os valores de porosidade dos demais materiais atendem a exigência da norma Petrobras N-2568, porém mesmo estando dentro de índices aceitáveis a vedação não está estabelecida, comprometendo significativamente o desempenho desses revestimentos no combate do desgaste corrosivo.

4.2 Resultado do ensaio de Polarização

A Figura 10 apresenta a curva de polarização obtida para o aço ASTM 178A em H_2SO_4 , quando analisado pelo método de Tafel, com auxílio do *Software GPES Manager*. Verifica-se no gráfico, que a densidade de corrente apresenta um aumento significativo do potencial de corrosão (E_{CORR}) de -399mV (ponto A). Continuando a elevação de potencial até aproximadamente 420mV (ponto B), neste ponto observa-se uma acentuada queda na densidade de corrente, indicando a formação de um filme

passivo. Todavia a densidade corrente volta a aumentar próximo a 700mV (ponto C), indicando que o filme passivo não é estável, prosseguindo até a dissolução do substrato.

A Figura 11 apresenta a sobreposição das curvas de polarização para os materiais ensaiados. Verificou-se que o alumínio apresentou o menor potencial de corrosão entre os materiais ensaiados, enquanto o Inconel 625 apresentou o maior. De uma forma geral, os materiais apresentaram curva de polarização característica, onde nota-se a queda da corrente de corrosão evidenciando o início do filme passivo e em seguida, o seu aumento, confirmando a fragilidade do óxido gerado.

O fenômeno de passivação no alumínio acontece espontaneamente em sua reação com o oxigênio, pois no processo de metalização por aspersão térmica a arco, o revestimento apresenta grande quantidade de óxidos e nitretos devido à interação com o ar atmosférico. Tal fato contribui para o aumento significativo

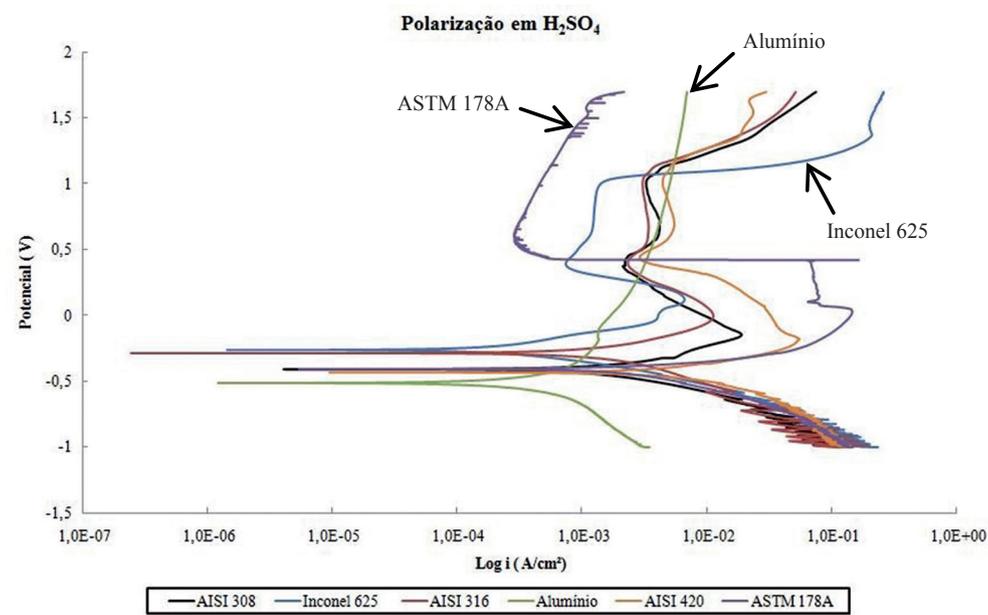


Figura 11. Curvas de polarização dos revestimentos metalizados.

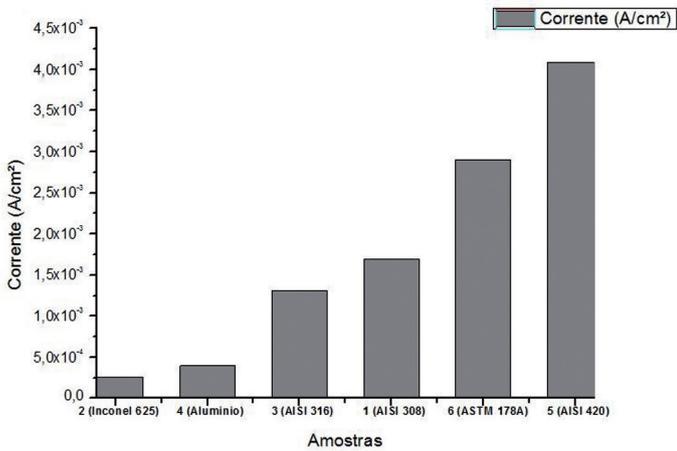


Figura 12. Valores de corrente de corrosão para as amostras estudadas.

de sua resistência a corrosão, devido a facilidade de passivação do óxido de alumínio. Por esse fato, a curva de passivação do alumínio (amostra 4) difere dos demais materiais, apresentando uma inclinação de quase 90°, indicando um pequeno crescimento da corrente de corrosão após a passivação, garantindo boa resistência a corrosão. Após a utilização do método de Tafel em todas as curvas, foram obtidos os valores de potencial e corrente de corrosão expostos na no gráfico da Figura 12.

Observou-se que os revestimentos de Inconel 625 e Alumínio apresentaram os melhores resultados, pois, considerando que a corrente de corrosão é diretamente proporcional à taxa de corrosão, pode-se afirmar que esses revestimentos apresentaram uma taxa de corrosão 10 vezes inferior aos demais. Também se observa a corrente crítica necessária para que o metal sofra passivação.

Ao se comparar o potencial de corrosão do aço ASTM A178 (-399 mV, ECS), com o potencial de corrosão do revestimento com alumínio (-518 mV, ECS), e com o potencial de corrosão

do Inconel 625 (-248 mV, ECS), verifica-se que o aço é 119 mV mais nobre que o alumínio em solução de H₂SO₄ 1M. Isto significa que, ao se colocar estes dois materiais em contato, o alumínio irá proteger o aço pelo processo de proteção catódica, onde o alumínio pode se comportar como um anodo de sacrifício. Por outro lado, o Inconel 625 protegeria o aço pelo processo de proteção anódica, semelhante a uma pintura, sendo que qualquer deslocamento do revestimento aspergido poderia expor o substrato ao processo de corrosão, diferentemente do alumínio aspergido.

4.4 Resultado do ensaio de Corrosão Acelerada em Câmara de SO₂.

O gráfico da Figura 13 apresenta a evolução da variação de massa nas amostras submetidas ao ensaio de corrosão acelerada

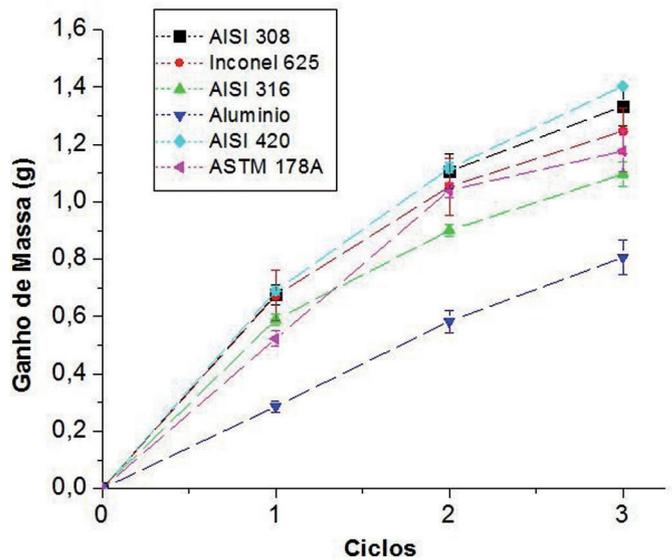


Figura 13. Gráfico de ganho de massa dos revestimentos.

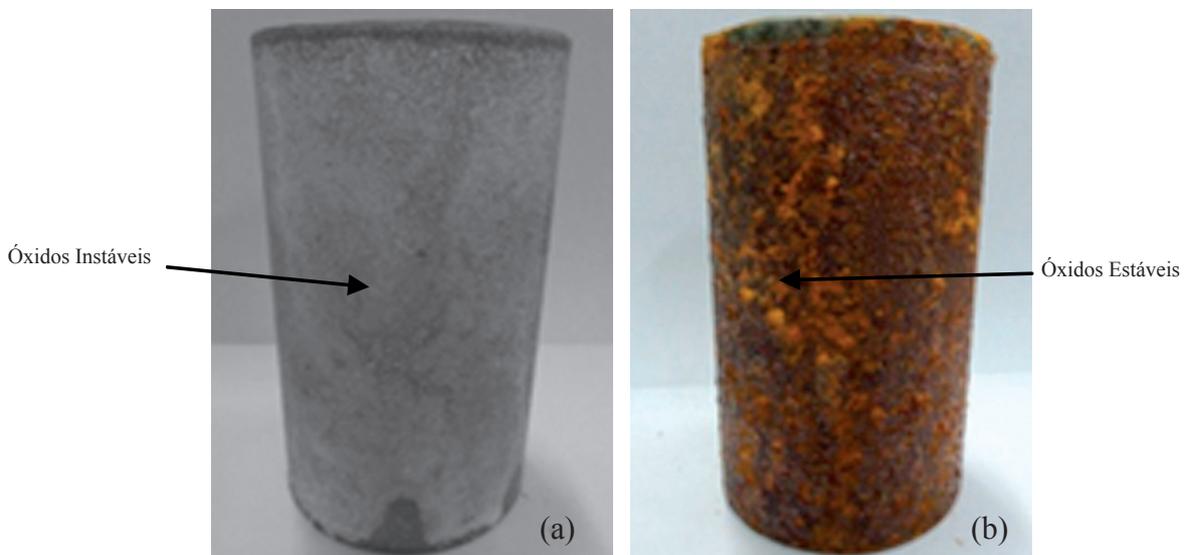


Figura 14. Corpos de prova após ensaio de corrosão em SO₂: (a) Revestimento de Alumínio. (b) Aço ASTM 178A sem revestimento.

em SO_2 . Pode ser observado, analisando-se os dados obtidos, que todos os revestimentos aspergidos apresentaram ganho de massa, inclusive o tubo sem revestimento, devido à formação de óxidos na superfície. A natureza desses óxidos é responsável pela maior ou menor resistência a corrosão dos materiais.

A Figura 14 apresenta um comparativo entre o comportamento de resistência a corrosão para o alumínio aspergido (Figura 14a) e para o tubo ASTM 178A na condição sem revestimento (Figura 14b). Pode ser observado que os corpos de prova aspergidos com alumínio apresentaram a formação de óxidos estáveis (característicos da oxidação do alumínio), garantindo maior proteção contra corrosão. Por outro lado, os tubos ensaiados sem revestimento apresentaram a formação de óxido de ferro, os quais apresentam menor aderência, facilitando assim a sua remoção e por consequência o aumento da velocidade de corrosão.

5. Conclusões

A metalização com o Alumínio obteve melhor comportamento no ensaio de dobramento. Essa característica é decorrente da maior ductilidade da camada metalizada, além do menor índice de porosidade dentre os revestimentos analisados. O ótimo desempenho desse material frente ao ensaio de dobramento a 180° , sugere que existe uma boa adesão entre a camada metalizada de Alumínio sobre o substrato de ASTM 178A.

A corrosão acelerada por SO_2 revelou que todas as amostras apresentaram formação de óxidos, ou seja, todas obtiveram ganho de massa. Dentre os revestimentos estudados, o material Alumínio foi o que obteve melhor performance, pois foi o material com menor ganho de massa. Esse fator é uma indicação do menor índice de corrosão dentre os revestimentos estudados.

O ensaio de polarização revelou que os materiais com maior capacidade de passivação superficial são o Inconel 625 e o Alumínio. Isso se dá pela menor corrente de corrosão que estes materiais apresentaram no ensaio, e esse comportamento é um sinônimo de boa resistência a corrosão. Na prática o alumínio tende a proteger o substrato pelo processo de proteção catódica, onde o alumínio se comporta como um anodo de sacrifício. E o Inconel 625 realiza uma proteção anódica do tubo constituído do aço ASTM 178A.

Por apresentar bons índices de resistência a corrosão, tanto no ensaio de corrosão acelerada por SO_2 quanto no teste de polarização, o material Alumínio é a melhor indicação dentre os revestimentos estudados, para recobrir os tubos do aquecedor tubular do tipo recuperativo de fluxo cruzado do Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda (CTJL).

6. Referência Bibliográfica

[1] ASM; Metals Handbook Series, Corrosion: fundamentals, testing and protection. Vol. 13A, 2003.
 [2] ASTM A 178; Standard Specification for Electric-Resistance-Welded Carbon Steel and Carbon-Manganese Steel Boiler and Superheater Tubes, Vol. 03.03. 2002.
 [3] ASTM G 15-02; Standard terminology relating to corrosion and corrosion test. American Society for Testing and Materials, 2002.

[4] ASTM G 5- 94; Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. American Society for Testing and Materials, 2011.
 [5] CAPRA, S.; Desenvolvimento de intermetálicos Fe/Al através de aspersão térmica e tratamento posterior. Tese (Mestrado). Engenharia Mecânica. UFPR- Universidade Federal do Paraná. Paraná, Curitiba 2005.
 [6] CHANDLER P. E.; QUIGLEY M. B. C.; The application of plasma-sprayed coatings for the protection of boiler tubing, in: proceedings of the 11th international thermal spraying conference, Montreal, Canada, 1986.
 [7] COSTA R. C.; ROCHA A. S.; KEJELIN N. Z.; Estudo do Desempenho de Revestimentos Metálicos Depositados Pelo Processo de Aspersão Térmica à Arco, em Relação ao Desgaste Erosivo em Trocadores de Calor Ar/Gases. 38º Congresso Nacional de Soldagem - CONSOLDA, Minas Gerais 2012
 [8] DUTRA, A. N.; Proteção Catódica - Técnica de combate a Corrosão 4ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.
 [9] EVANS, U.R.; The corrosion and Oxidation of Metals, Edward Arnold, Great Britain, 1976.
 [10] FELIPPE, L.; COELHO R.; COSTA D.; Inovação no método de manutenção dos pré-aquecedores de ar tipo carcaça e tubos da usina termoelétrica Jorge Lacerda B UTLB Eletrosul - vantagens técnico-econômicas. 2º SIM - Seminário Interno de Manutenção. Capivari de Baixo, 2011.
 [11] GEMELLI, E.; Corrosão de Materiais Metálicos e sua Caracterização. 1ª Ed. Rio Janeiro. LTC, 2001
 [12] GENTIL, V.; Corrosão. 3ª Edição, Rio de Janeiro: S.A, 1996.
 [13] GENTIL, V.; Corrosão. 6ª Edição – Editora LTC, 2011.
 [14] JONES, D.; Principles and prevention of corrosion. 2ª ed. Prentice Hall: Upper Saddle River, 1996.
 [15] KRIENBUEHL, P.K.; WIDMER, K.; Corrosion protection by arc sprayed aluminum: new developments. Swiss Aluminum Ltda, p.436-442. Switzerland 1974.
 [16] N-2568 Norma Petrobras; Revestimentos anticorrosivos aplicados por aspersão térmica. Rio de Janeiro, 2004.
 [17] PIMENTA, G.; Pilha de corrosão, Disponível em: <<http://www.abraco.org.br.htm>> Acesso em 04 de Outubro de 2012.
 [18] RODRIGUEZ, R. M. H. P.; Formação de Óxidos nos Revestimentos de Alumínio Depositados por Aspersão Térmica, Tese (doutorado) UFPR - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003
 [19] SCHIEFLER, Marcos F. O. BUSCHIBELLI, A. J. Estudo eletroquímico e microestrutural de revestimentos aspergidos termicamente para a proteção do aço contra corrosão marinha. 6º Conferência sobre Tecnologia de Materiais. 2002
 [20] ROZENFELD, L.L.; Atmospheric corrosion of metals, NACE, Houston, Texas, 1972.
 [21] ZANINI L.C. et al; Estudo de alternativas para minimização do desgaste erosivo e corrosivo em trocadores de calor de usinas termoelétricas a carvão. CECEMM, Florianópolis, 2007.