

Avaliação do Desempenho no Ambiente de uma Caldeira de Revestimento Metálico de Liga à Base de Ferro Obtido por Aspersão Térmica a Arco Elétrico

Bianca Barroso Marques¹ , André Rocha Pimenta^{1,2,3} , Danilo de Castro Simões¹ , Marília Garcia Diniz¹ 

¹ Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Universidade Federal Fluminense – UFF, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Montagem Industrial, Niterói, RJ, Brasil.

³ Instituto Federal do Rio de Janeiro – IFRJ, Campus Paracambi, Laboratório de Instrumentação e Simulação Computacional, Paracambi, RJ, Brasil.

Como citar: Marques BB, Pimenta AR, Simões DC, Diniz MG. Avaliação do desempenho no ambiente de uma caldeira de revestimento metálico de liga à base de ferro obtido por aspersão térmica a arco elétrico. Soldagem & Inspeção. 2022;27:e2721. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI27.21>

Resumo: A Aspersão Térmica (ASP) é um processo para fabricação de revestimentos metálicos de baixo custo e alta produtividade. Esses revestimentos são usados em tubos de trocadores de calor para promover boa resistência a corrosão e ao desgaste. Este trabalho avaliou um revestimento metálico Fe-Cr-Nb-Ni-B depositado por ASP, nas condições sem selante e com selante à base de resina de silicone e alumínio, na proteção de tubos de aço quanto à corrosão e desgaste por atrito de partículas no ambiente de uma caldeira para geração de vapor d'água. Selantes ou esquemas de pintura, são soluções comumente usadas para melhorar a resistência à corrosão. As situações testadas expuseram o revestimento e substrato de amostras com e sem selante, em uma caldeira durante sete e doze meses. Utilizou-se técnicas de metalografia, microscopia eletrônica de varredura, análise química por espectroscopia de energia dispersiva e análise e processamento digital de imagens. Os resultados mostraram que embora o selante tenha sido removido do revestimento pelo atrito do fluxo de partículas presentes na água em operação na caldeira, o revestimento metálico manteve-se íntegro em relação à sua aderência ao substrato e camada de espessura depositada, sendo considerado uma solução promissora para a proteção de tubulações de caldeiras.

Palavras-chave: Aspersão térmica; Revestimento metálico; Selante; Caldeira.

Performance Evaluation in a Boiler Environment of a Metallic Coating Obtained by Electric Arc Thermal Spraying Using Iron-based Alloy

Abstract: The Arc Spray Process (ASP) is a low-cost and high-productivity process for making metallic coatings. These coatings are used in heat exchanger pipes to promote good corrosion and wear resistance. This work evaluated a metallic coating of Fe-Cr-Nb-Ni-B alloy deposited by ASP to protect carbon steel pipes boiler to generate steam. Were considered the coating performance about corrosion resistance and the wear due to particles' friction. Two conditions were tested, coating with sealant based on silicone resin with aluminum and without sealant. Sealants or paint layers are commonly used to improve coatings corrosion resistance. Two samples for each condition tested remained in the boiler environment for seven and twelve months. Metallographic preparation techniques, Scanning Electron Microscopy, chemical analysis by Energy Dispersive Spectroscopy, and Digital Image Analysis and Processing were used. The results showed that sealant was removed from the coating by the friction of the flow of particles present in the boiler's water operation. Nevertheless, the metallic coating remained intact in its adhesion to the substrate and layer of deposited thickness. The proposed solution was considered a promising solution for protecting steel pipes of boilers.

Keywords: Thermal spray; Metal coating; Sealant; Boiler.

1. Introdução

Uma grande variedade de componentes mecânicos metálicos opera em condições severas de temperatura, fluidos corrosivos e em ambientes com a presença de fluxo de partículas e impurezas. Os tubos em uma caldeira são exemplos de aplicações mecânicas onde os materiais sofrem grande desgaste por operarem em temperaturas relativamente altas, ambiente corrosivo e abrasivo devido ao particulado presente no fluido em movimento, o que frequentemente resulta em falhas do componente [1-4]. Assim, o reforço da superfície de tubulações de caldeiras, pela aplicação de um revestimento, tem sido uma opção bastante interessante para a proteção contra a deterioração por corrosão e o desgaste mecânico [5,6].

Recebido: 18 Fev., 2022. Aceito: 20 Set., 2022.

E-mail: rochapimenta@gmail.com (ARP)



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a [licença Creative Commons Attribution](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Entre os vários métodos de proteção por uso de revestimento, a Aspersão Térmica (ASP) de um material adequado sobre uma superfície pode prolongar a vida útil da peça, mantendo suas propriedades mecânicas originais, enquanto protege contra o desgaste e a corrosão [7-15]. Comparativamente, o processo de ASP por arco elétrico é uma solução relativamente de baixo custo, rápida e simples de ser executada, podendo ser realizada em campo [16,17]. Seus benefícios refletem nos custos do processo, de forma que a substituição da peça revestida ocorrerá em um intervalo de tempo maior, e ainda, para uma aplicação que necessita que suas superfícies resistam ao atrito gerado por outras superfícies ou partículas, será possível a utilização de um material de menor custo com a aplicação de um revestimento altamente resistente a abrasão [7,13,18].

Revestimentos obtidos por ASP arco elétrico costumam ter superfície irregular (rugosidades médias Ra podem variar entre 10-200 μm) e com alguns defeitos em sua estrutura, incluindo poros abertos. A utilização de selantes orgânicos ou inorgânicos (esquemas de pintura) aplicados sobre os revestimentos logo após a deposição metálica têm a finalidade de vedar os poros da superfície do revestimento, isto é, poros abertos. Os selantes podem impedir ou retardar a ação de agentes oxidantes, pois estes podem atacar o próprio revestimento, ou até mesmo o metal de base. Entende-se então que a utilização do selante aumenta a resistência a corrosão do metal de base, resistência essa que já é otimizada pela aplicação do revestimento puro [19-21].

Neste trabalho a escolha de arame ou consumível para revestir com composição química à base de Fe-Cr consistiu em análise de arames que apresentavam como característica técnica, boa resistência ao desgaste erosivo por partículas sólidas, resistência ao trabalho em temperaturas elevadas e elevada resistência à corrosão para ambientes agressivos [22-26]. Desta forma, foi avaliado um revestimento metálico de Fe-Cr-Nb-Ni-B depositado por aspersão térmica a arco elétrico, nas condições sem selante e com um selante à base de resina de silicone com pigmentação de alumínio, na proteção de tubos de aço carbono quanto à corrosão e desgaste, causados pelo ambiente agressivo de caldeiras para produção de vapor e que operam com água sem tratamento, isto é, com a presença de íons agressivos às suas tubulações, tais como cloro, sódio e potássio.

2. Materiais e Método

Uma liga Fe-Cr-Nb-Ni-B foi depositada pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico sobre uma chapa de aço carbono com dimensões de 1 x 1 m com 8 mm de espessura, com composição química conforme a Tabela 1. Tubos de caldeiras costumam ser fabricados em aço ASTM A516 grau 60, cujos teores de carbono e manganês estão de acordo com os da chapa utilizada [28].

Tabela 1. Composição química da chapa de aço utilizada como substrato.

Elemento	% em peso
C	0,173
Si	< 0,05
Mn	1,1
P	0,015
S	0,007

Fonte: ArcelorMittal [27].

Antes da ASP, o substrato recebeu uma preparação superficial por jateamento abrasivo com óxido de alumínio G16/20 (mistura do padrão grão 16 e grão 20 angular) para limpeza e obtenção de um padrão de rugosidade para garantir aderência mecânica do revestimento aspergido [29]. Após o jateamento a rugosidade média obtida foi de 43 μm .

A deposição da liga metálica foi realizada utilizando os parâmetros de ASP (Tabela 2) selecionados de acordo com a expertise técnica e histórico fornecido pela empresa parceira que realizou a deposição metálica. O gás atomizante utilizado foi ar comprimido e o operador permaneceu com a pistola de aspersão num ângulo em torno de 90°.

Tabela 2. Parâmetros utilizados no processo de aspersão térmica manual.

Tensão [V]	30
Corrente [A]	100
Pressão do ar atomizante [MPa]	0,48
Distância de projeção [mm]	100
Espessura do revestimento [μm]	500
Taxa de deposição [kg/h]	5

A Tabela 3 apresenta a composição química do consumível utilizado no processo de ASP, segundo informações fornecidas pelo fabricante dos arames e dados fornecidos pela empresa parceira deste projeto. A taxa de deposição foi medida pesando-se um corpo de prova preparado e sem revestimento e pesando-se uma quantidade de material a ser depositado. A quantidade a ser depositada teve seu tempo de deposição medido e, em seguida, pesou-se o corpo de prova com a camada depositada. Estas medidas permitiram o cálculo da taxa de deposição em Kg/h. No processo ASP arco elétrico a taxa de deposição pode variar conforme a velocidade de alimentação do arame.

Tabela 3. Composição química do consumível ou arame para aspersão.

Elemento	% em peso
Cr	13,2
Nb	6,0
Ni	5,5
B	4,2
Al	2,0
Mn	1,3
Si	1,2
Fe	Balanço

Fonte: Dados fornecidos pela empresa VGK, 2017 [30].

Após o processo de revestimento, foi aplicado um selante à base de resina de silicone com pigmentação de alumínio e em apenas partes de amostras obtidas da chapa revestida (Figura 1). Segundo as instruções de aplicação fornecidas pelo fabricante do selante (aplicação com pincel de cerdas finas para pequenas áreas) e conforme os dados fornecidos pela empresa, o produto teria uma espessura de camada depositada no entorno de 50 µm para revestimento aspergido conforme os parâmetros de aspersão utilizados.

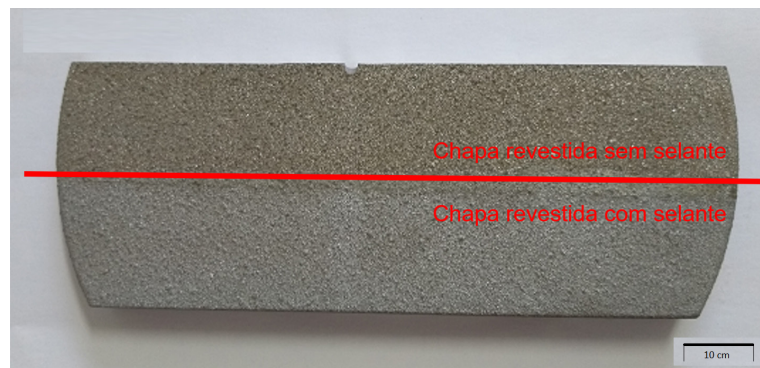


Figura 1. Parte da chapa de aço revestida com o selante aplicado apenas na metade inferior.

Amostras menores foram retiradas utilizando-se uma cortadeira metalográfica modelo Arocor 80. Três amostras de aço apenas revestido e três amostras de aço revestido e com selante, todas com 13 x 9 mm de área, foram soldadas por técnica de soldagem por pontos em um dispositivo projetado para ser fixado entre os flanges da porta de visita da caldeira de produção de vapor de uma indústria farmacêutica localizada no Estado do Rio de Janeiro, com o objetivo de avaliar o desempenho do material *in loco*. A Figura 2 apresenta o projeto do dispositivo de fixação das amostras inseridas na caldeira e suas posições em relação ao sentido do fluxo de água do sistema.

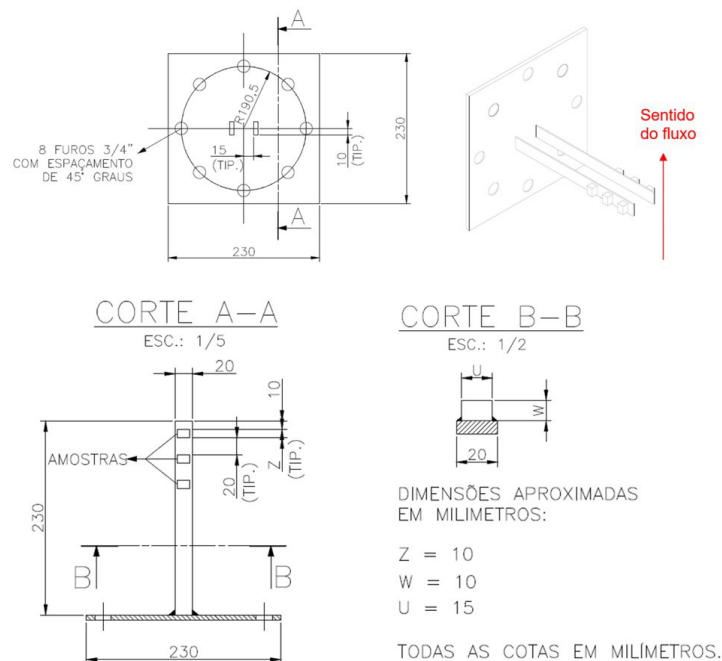


Figura 2. Projeto do dispositivo para fixação das amostras. Cotas em mm.

Após sete meses de exposição ao ambiente operacional da caldeira, duas amostras, uma com selante e outra sem selante, foram retiradas para análise. Mais duas amostras (com e sem selante) foram retiradas após um ano de permanência na caldeira. Todas as amostras, tanto as que não foram colocadas na caldeira (controle), quanto as que permaneceram lá, foram submetidas ao processo de preparação metalográfica para serem observadas por MEV e MO e submetidas a análise química semi-quantitativa por técnica de EDS. As amostras foram embutidas tanto em baquelite quanto em resina de cura a frio, com a seção transversal do sistema substrato/revestimento expostas. Foram lixadas manualmente com lixas metalográficas na sequência granulométrica 220, 400, 600, 800 e 1200 *mesh*. Posteriormente, foram polidas com pastas de diamante de 3 e 1 μm de granulometria.

Para a caracterização do selante, foi utilizado um MEV modelo JSM-6510/LV, operando a 20 keV e com sistema para microanálise química por EDS. As imagens por ele obtidas foram analisadas através do *software* para processamento digital de imagens FIJI (Image J), com o objetivo de mensurar a espessura média da camada de selante aplicada [31,32]. Foram realizadas cerca de 500 medidas na camada de selante.

Já as amostras com e sem selante expostas ao ambiente da caldeira foram analisadas em um MEV modelo TM3000, operando a 15 keV. O equipamento era equipado com um sistema de detecção de Espectroscopia de Energia Dispersiva modelo X Flash MIN SVE. O *software* FIJI também foi utilizado para avaliar a frequência da presença de óxido de ferro entre o substrato e o revestimento para amostras que foram inseridas na caldeira. Foram avaliadas 20 imagens da interface substrato / revestimento com 1000X de magnificação, para as condições sem e com selante, onde 109 linhas equidistantes e paralelas foram traçadas em cada uma das imagens para avaliar com que frequência interceptavam região contendo óxido de ferro [31,32].

Foram utilizadas imagens de microscopia óptica (MO) das seções transversais de todas as amostras testadas para avaliação de espessura e análise qualitativa da integridade do revestimento, todas obtidas por um microscópio ótico equipado com sistema de aquisição e captura de imagens digitais.

A caldeira deste estudo foi do tipo fogotubular vertical a gás natural. A Tabela 4 apresenta os dados operacionais do equipamento. A temperatura média da água no local onde as amostras foram inseridas era de 180°C.

Tabela 4. Dados operacionais da caldeira.

Caldeira fogotubular	
Capacidade de produção com água à 20°C [kgv/h]	500
Superfície de aquecimento [m ²]	22
N° de passes [unidade]	1
N° de câmaras de combustão [unidade]	1
N° de tubos [unidade]	90
Volume de água em operação [m ³]	0,9

Segundo informações de área, a caldeira em questão é preservada pelo método úmido, e, portanto, sempre antes de iniciar a operação são feitos testes que permitem verificar o estado da água existente dentro do equipamento. Os testes de dureza (titulação utilizando ácido etilenodiamino tetra-acético), sulfito, alcalinidade parcial/total e teste de cloretos são feitos pelo operador, que compara seus resultados conforme valores de referência e adiciona produtos conforme a necessidade de ajuste, seguindo a orientação da empresa responsável pelo tratamento da água. São usados alcalinizantes, fosfatos, sulfito, amida volátil, hidrazina e dispersante de lama para minimizar a agressão que uma água sem tratamento (ou água “dura”) poderia provocar. A Tabela 5 apresenta os limites recomendados dos parâmetros da água para caldeiras que operam com pressão de até 300 psi (2,07 MPa).

Tabela 5. Limites recomendados dos parâmetros da água para caldeiras que operam até 2,07 MPa.

Parâmetro	Limite máximo permitido
Alc. Hidróxida (ppm CaCO ₃)	400
Alc. parcial e fenolftaleína (ppm CaCO ₃)	250 a 500
Alc. Total do metilorange (ppm CaCO ₃)	700
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	5000
Cloretos (ppm Cl ⁻)	200
Dureza total (ppm CaCO ₃)	0
Fosfato (ppm PO ₄)	10 a 40
pH	10,7 a 11,3
Sílica (ppm SiO ₂)	150
Sólidos totais dissolvidos (NaCl)	2500
Sulfitos (ppm SO ₃)	5 a 20

Fonte: Dados obtidos em área de operação da caldeira, 2019.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para a composição química do revestimento após o procedimento de ASP, assim como a análise realizada na superfície após a aplicação do selante. Na amostra após a deposição do revestimento metálico os elementos encontrados e seus percentuais estão de acordo com a composição química nominal dos arames consumíveis usados (Tabela 3). Os resultados obtidos após a aplicação do selante e antes da exposição ao ambiente da caldeira, verificou-se elevados picos para as energias características do alumínio e do silício e que confirmaram suas presenças significativas e em maior quantidade associadas ao selante.

Tabela 6. Composição química do revestimento obtida por EDS (% em peso).

Elemento	Amostra	
	Após deposição do revestimento metálico	Após deposição do revestimento e aplicação do selante
Cr	14,53	3,00
Nb	8,72	---
Ni	5,28	0,15
B	---	---
Al	1,88	55,17
Mn	0,72	---
Si	1,67	16,52
Fe	Balanço	25,16

O EDS foi utilizado como uma técnica de microanálise semi-quantitativa para obtenção da ordem relativa dos elementos presentes. Os valores obtidos estão próximos aos reais quantitativos relacionados aos arames usados, com exceção do boro que, por ser um elemento de baixo peso atômico, dificilmente pode ser detectado pela técnica de EDS, tal como outros elementos leves [33,34].

As amostras com selante também foram analisadas quimicamente através de mapas de cores atribuídas aos elementos identificados, por dois equipamentos diferentes (Figuras 3 e 4). Os resultados em ambos os equipamentos confirmaram a maior concentração de alumínio (azul escuro) e silício (amarelo) recobrendo o revestimento. O selante aplicado era, segundo o fabricante, uma resina de silicone com pigmentação de alumínio e que supostamente deveria formar uma espessura de camada depositada no entorno de 50 µm. Os resultados confirmaram sua composição química. Na Figura 4, a penetração do selante por capilaridade em uma trinca pode ser observada.

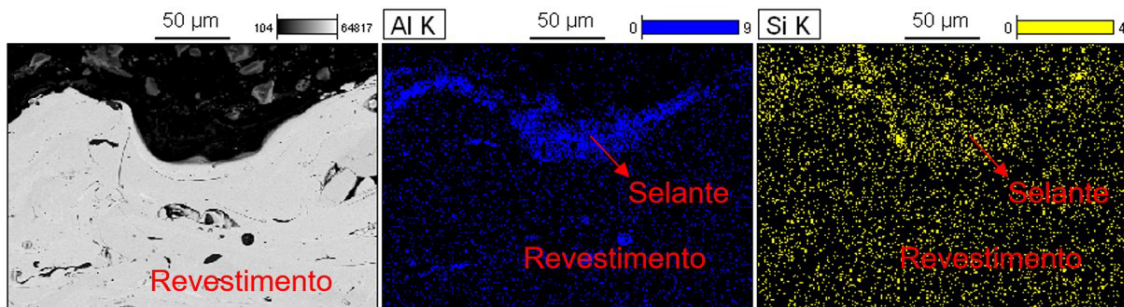


Figura 3. Mapeamento químico por MEV-EDS da seção transversal do revestimento com selante antes da exposição em ambiente da caldeira.

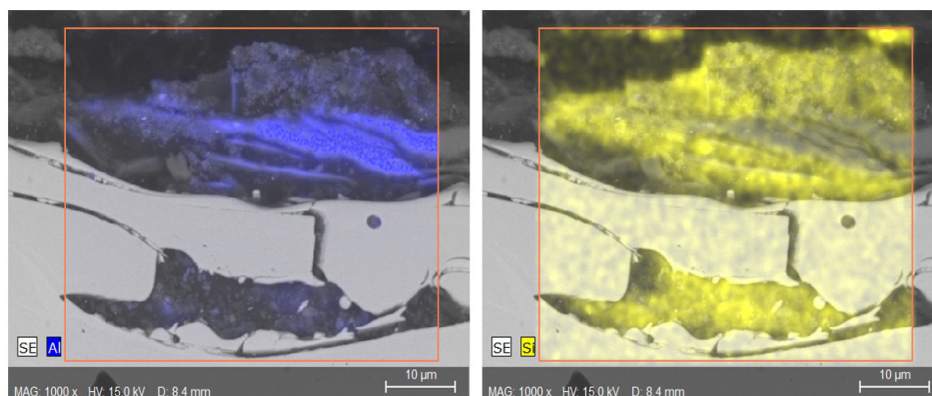


Figura 4. Mapeamento químico por EDS da superfície do revestimento com selante antes da exposição em ambiente da caldeira. A penetração do selante através da trinca pôde ser observada.

A espessura média do selante obtida por PDI para todas as regiões analisadas foi de 20 μm , 40% menor do que o especificado pelo fabricante. A Figura 5 exemplifica as medições das espessuras do selante realizadas através do *software* FIJI.

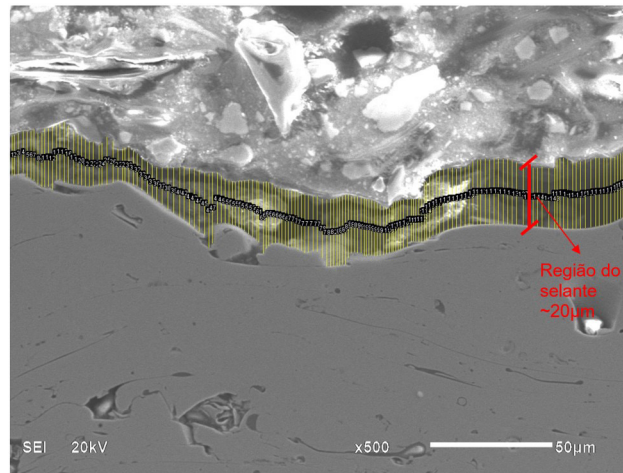


Figura 5. Medições da espessura do selante usando o *software* FIJI.

Após sete meses de inserção em ambiente da caldeira, tempo de permanência das primeiras amostras, uma análise visual e qualitativa mostrou grande acúmulo de resíduo na superfície. Nesta avaliação não foram identificadas diferenças entre as amostras com e sem selante. A Figura 6 mostra imagens destas primeiras amostras.

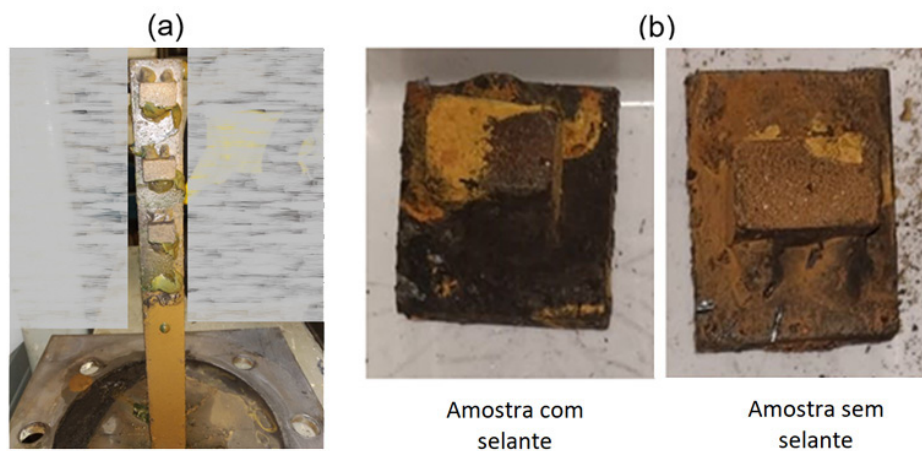


Figura 6. Amostras após sete meses de exposição. (a) suporte onde estavam as amostras. (b) amostras recobertas por resíduo de cor cobre-esverdeado.

Observando a seção transversal submetida à preparação metalográfica da amostra com selante após sete meses de permanência, não foi identificada a presença de qualquer vestígio do selante. A tinta, muito provavelmente, foi arrancada pelo impacto e atrito das partículas presentes na água da caldeira. Sendo o selante resistente a temperaturas maiores que 250°C, segundo o fabricante, não é suposto que a temperatura de operação na caldeira tenha provocado tal degradação. Como a espessura de selante obtida na aplicação foi 40% menor do que o especificado pelo fabricante, isso pode ter facilitado o arrancamento total do produto. A Figura 7 exemplifica regiões analisadas por EDS da seção transversal de amostras inicialmente com selante (Figura 7a, presença do alumínio – mapeado em azul) e após sete meses em caldeira (Figura 7b, sem alumínio). Não foi possível a análise do silício devido a baquelite utilizada na preparação da amostra também possuir alto teor deste elemento. A hipótese de que tenha ocorrido uma difusão em estado sólido dos elementos componentes do selante em direção ao revestimento não foi considerada, uma vez que valores de coeficiente de difusão para alumínio e silício no sistema cristalino do ferro, são fortemente dependentes da temperatura e geralmente apresentam valores significativos em temperaturas maiores que as de operação da caldeira [35].

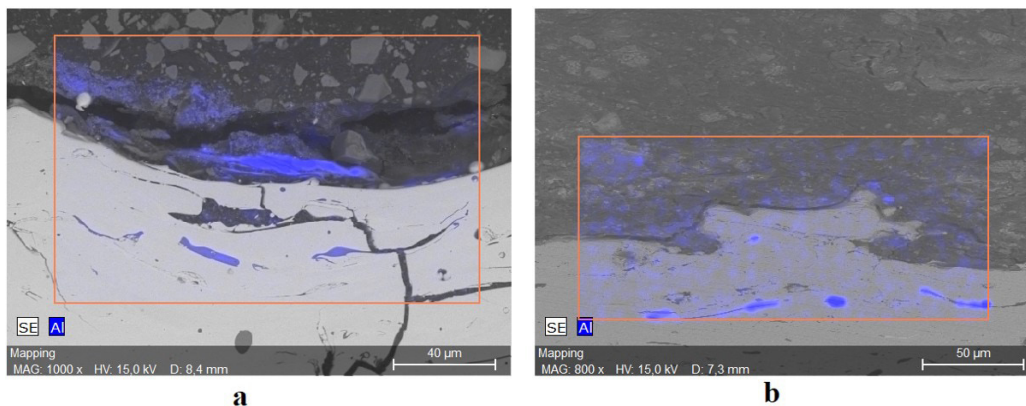


Figura 7. Mapeamento por EDS da seção transversal de amostras com selante antes da exposição ao ambiente caldeira por sete meses (a) e depois (b).

Já nas primeiras amostras retiradas da caldeira, após sete meses, foram identificadas regiões contendo óxido de ferro na interface substrato / revestimento, além do já esperado óxido de alumínio. Este último foi proveniente da etapa de preparação do substrato por jateamento com alumina, antes da aspersão térmica e foi encontrado em amostras tanto não expostas quanto em amostras expostas ao ambiente caldeira. A propagação do óxido de ferro nesta região pode causar o descolamento do revestimento e sucumbir o sistema de proteção ao substrato, uma vez que os óxidos possuem propriedades distintas das ligas metálicas e comportam-se como verdadeiras trincas [7]. A Figura 8 mostra a região de interface entre o substrato e o revestimento e as presenças do óxido de ferro (regiões em tons de cinza intermediário) e alumina (regiões em tons de cinza mais escuro), enquanto a Figura 9 apresenta os espectros de EDS de ambos os óxidos encontrados. Amostras revestidas que não foram inseridas no ambiente caldeira, apresentaram alumina na interface e não apresentaram óxido de ferro (Figura 8a).

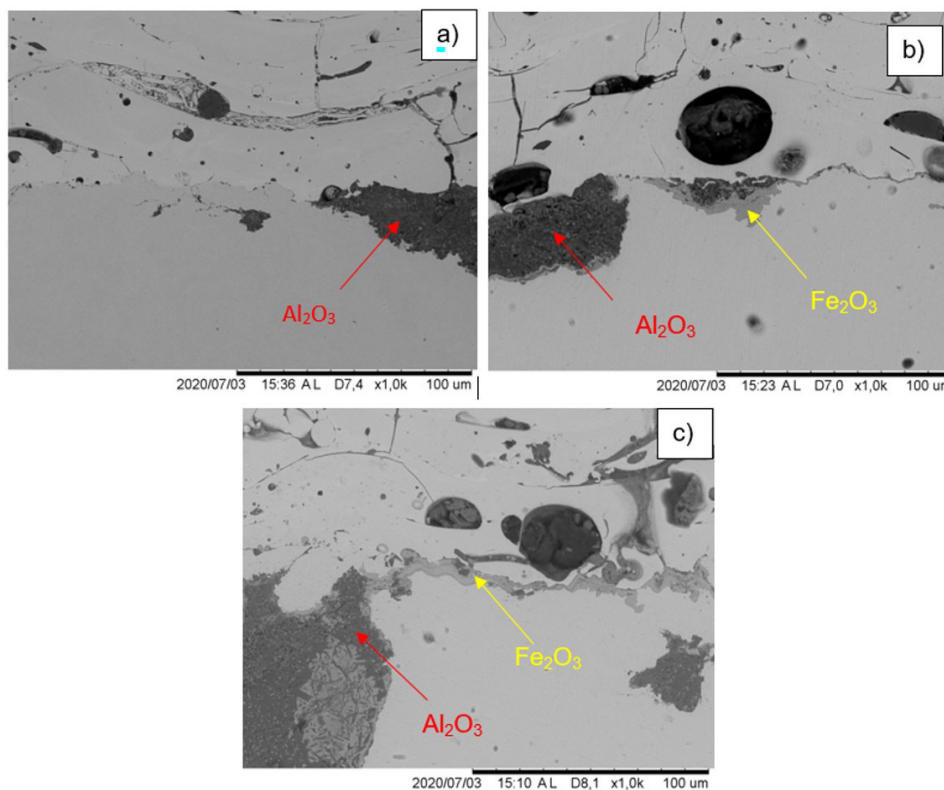


Figura 8. Seção transversal das amostras na interface revestimento / substrato: (a) antes da exposição; (b) e (c) após sete meses de exposição; (b) com selante; (c) sem selante.

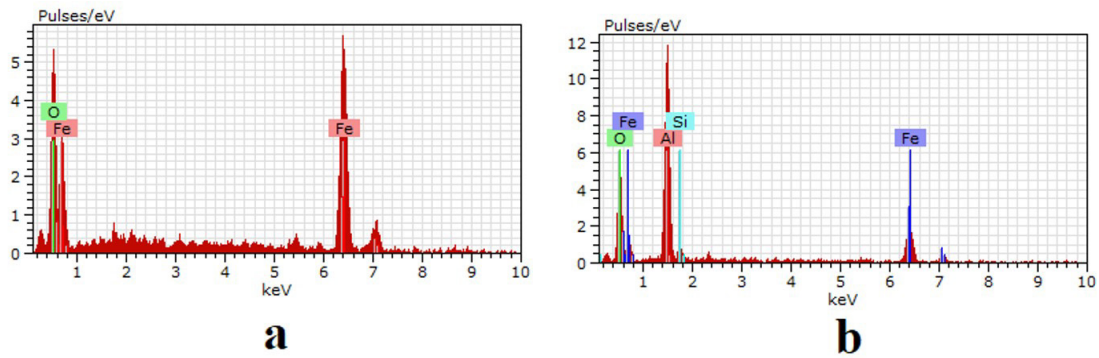


Figura 9. Resultado de EDS dos óxidos presentes na Figura 8: (a) Fe_2O_3 ; (b) Al_2O_3 .

A formação de óxido de ferro na interface substrato / revestimento tanto na amostra com selante quanto na amostra sem selante, pode ser explicada pela não proteção das bordas do sistema em ambos os casos, isto é, as laterais do sistema estavam expostas ao fluido e ao escoamento de água da caldeira, simulando a situação que se teria no caso de um tubo revestido ser danificado. Ressalta-se que as medições foram realizadas no centro da peça, com o objetivo de minimizar o fato das bordas não serem protegidas. Contudo, o desempenho do sistema revestimento / substrato pode ser considerado satisfatório para as condições analisadas, uma vez que apesar da formação do óxido de ferro, não houve deslocamento do revestimento. Nos casos de deslocamento, assim como observado por Belém et al. [36], uma grande região do substrato fica exposta, levando o equipamento a falhar.

As amostras retiradas após um ano de exposição ao ambiente caldeira não apresentaram quaisquer diferenças de resultados em relação às amostras retiradas após sete meses, seja em relação à presença de resíduos, à não presença do selante, à presença de óxido de ferro na interface substrato / revestimento ou em relação à integridade da espessura e aspecto de topografia do revestimento antes e depois do ambiente caldeira.

A frequência média do aparecimento de óxido de ferro na interface foi de $60,8\% \pm 17,5$ considerando todas as situações analisadas, isto é, sem ou com selante e para todos os tempos testados. Tanto a espessura que inicialmente era de $410 \pm 36 \mu m$ quanto a morfologia da superfície estavam preservadas e iguais à situação de antes da exposição. A Figura 10 mostra imagens dos aspectos dos revestimentos antes e depois da exposição ao ambiente da caldeira. Apesar da presença dos pontos contendo óxido de ferro entre o revestimento e o substrato para as amostras que permaneceram na caldeira, ele manteve-se íntegro frente ao ataque abrasivo das partículas presentes no fluido, que retiraram apenas o selante após os tempos analisados.

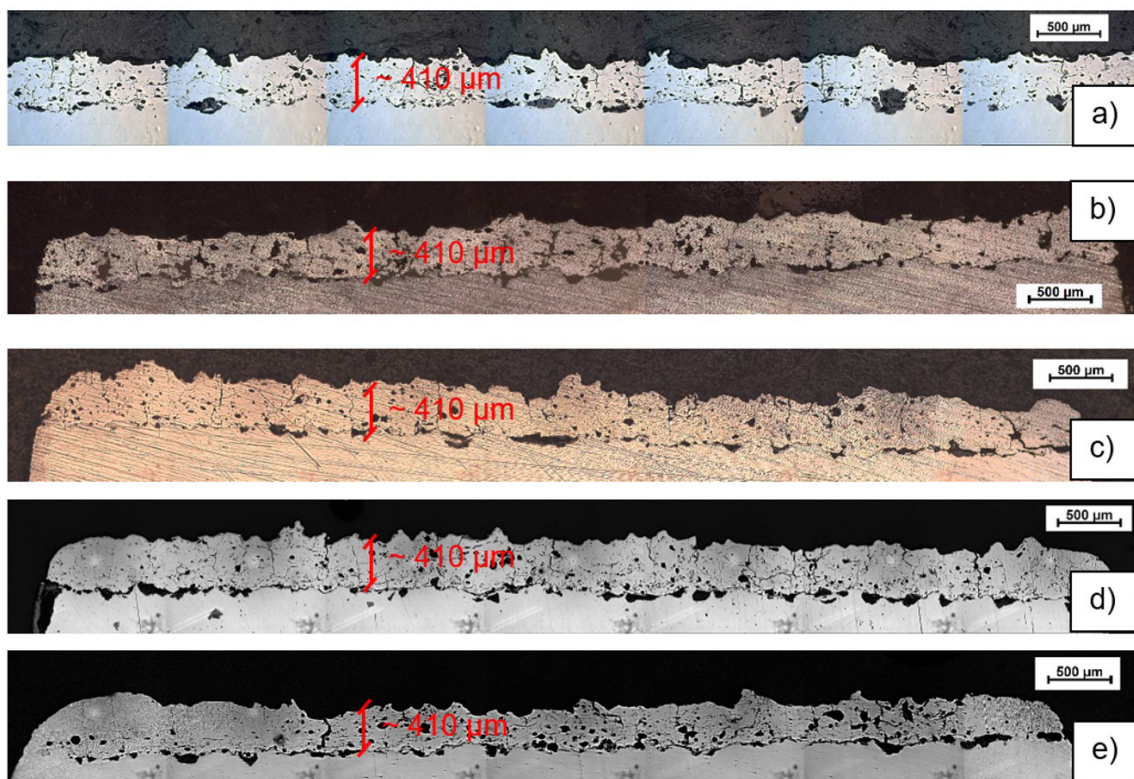


Figura 10. Aspectos do revestimento ao MO: (a) sem uso, (b) após sete meses de exposição, com selante, (c) após sete meses de exposição, sem selante, (d) após um ano de exposição, com selante e (e) após um ano de exposição, sem selante.

Os resultados obtidos em relação à manutenção de espessura do revestimento, de sua morfologia e o fato de estar aparentemente bem aderido ao substrato, apesar da presença de óxido de ferro na interface revestimento / substrato, foram considerados positivos numa situação que simulou a existência de uma falha no revestimento e que deixou exposto todo sistema ao ambiente da caldeira. O selante testado não se mostrou eficiente para o preenchimento dos poros superficiais do revestimento na proteção do metal de base.

Estudo realizado por Liscano et al. [20] identificou que a utilização do selante melhora o desempenho à corrosão do revestimento, contudo, os resultados aqui apresentados indicam que a sua utilização se torna ineficaz em aplicações sujeitas à abrasão. As análises realizadas apontaram que após apenas sete meses de exposição no ambiente da caldeira, o selante foi removido, muito provavelmente devido a ação das partículas em suspensão.

Gomes et al. [28] também estudaram o mesmo revestimento objeto de avaliação deste trabalho. Eles mostraram que ele apresentava alguns defeitos típicos, tais como partículas parcialmente fundidas, óxidos, trincas, microtrincas e porosidades. A fração volumétrica de defeitos internos no revestimento foi $5 \pm 2\%$ incluindo trincas e poros, 1,4% de óxidos de alumínio e 0,2% de óxidos de silício presentes na matriz. Estes valores encontram-se dentro do esperado para revestimentos metálicos obtidos por aspersão térmica a arco elétrico. Ainda segundo Gomes et al., o valor médio de dureza do revestimento foi de (1.115 ± 130) HV0,1.

4. Conclusões

O procedimento de ASP utilizado para aplicação do revestimento mostrou-se adequado, o arame não apresentou perda de elementos de liga durante o processo de deposição. O selante embora tenha sido detectado, apresentou uma espessura de 20 μm , menor que a esperada.

A exposição das amostras na caldeira permitiu concluir que: as partículas presentes na água da caldeira promoveram a remoção do selante que foi aplicado na superfície do revestimento; o ambiente corrosivo da caldeira resultou na formação de uma rede de óxidos de ferro na interface revestimento / substrato. Esses efeitos foram observados em ambos os tempos estudados, sete e doze meses.

O selante estudado não teve o comportamento esperado e, portanto, não é indicado para essa aplicação. Já o revestimento metálico manteve-se íntegro, aparentemente bem aderido e sem perda de espessura, sendo considerado uma solução promissora para a proteção de tubos de aço carbono em ambientes de caldeira ou similares. Os diferentes períodos testados não geraram mudanças significativas no revestimento, sendo necessário um período de exposição maior para estimar seu tempo de vida útil como sistema de proteção no ambiente caldeira.

Contribuição dos autores

BBM: investigação e redação do manuscrito. ARP: metodologia, investigação, recursos e revisão final do manuscrito; DCS: investigação e redação do manuscrito; MGD: conceituação, metodologia, investigação, revisão final do manuscrito e supervisionou a pesquisa.

Referências

- [1] Ahmadi A, Akmal MS, Pasha A, Yareie S. Failure analysis of cracked 2.25Cr–1.0Mo steel tubes of an oil refinery boiler. *Engineering Failure Analysis*. 2020;110:104435. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104435>.
- [2] Soltanloo M, Babaee MH, Hosseini Yeganeh SE, Shafiei A, Akbari AH. Root cause failure investigation of a boiler waterwall tube employed in a 325 MW thermal power plant: caustic corrosion phenomenon and its effects. *Engineering Failure Analysis*. 2022;133:133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105974>.
- [3] Mukhopadhyay G, Bhattacharyya S. Failure analysis of an attemperator in a steam line of a boiler. *Engineering Failure Analysis*. 2011;18(5):18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.03.029>.
- [4] Shokouhmand H, Ghadimi B, Espanani R. Failure analysis and retrofitting of superheater tubes in utility boiler. *Engineering Failure Analysis*. 2015;50:20-28 <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.01.003>.
- [5] Saliba PA, Soares RB, Pena CP, Lins VFC. Avaliação da corrosão em tubos da fornalha baixa de caldeiras de recuperação química. In: *Proceedings of INTERCORR 2018*. Rio de Janeiro: ABRACO; 2018.
- [6] Kumar S, Kumar M, Handa A. Comparative study of high temperature oxidation behavior and mechanical properties of wire arc sprayed Ni Cr and Ni Al coatings. *Engineering Failure Analysis*. 2019;106:106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104173>.
- [7] ASM International. *ASM Handbook vol 5A Thermal spray technology*. Ohio: ASM International; 2004.
- [8] Vaz RF, Sucharski GB, Chicoski A, Siqueira IBAF, Tristante R, Pukaszewicz AGM. Comparison of FeMnCrSi cavitation resistance coatings deposited by twin-wire electric arc and high-velocity oxy-fuel processes. *Journal of Thermal Spray Technology* 2021;30:754-771. <http://dx.doi.org/10.1007/s11666-020-01145-z>.

- [9] Pereira SE, Costa HRM, Pimenta AR, Diniz MG. Aspectos microestruturais e de resistência a corrosão de ligas Fe-Cr e Fe-Co aspergidas termicamente por arco elétrico. *Matéria* (Rio de Janeiro). 2021;26(4):e13076. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210004.1376>.
- [10] Costa RC, Dacoreggio MV, Kejelin NZ, Comeli FW. Avaliação da resistência a corrosão de revestimentos metálicos depositados por aspersão térmica a arco: uma aplicação em trocadores de calor. *Soldagem e Inspeção*. 2014;19(4):292-301. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/S11904.02>.
- [11] Limar CRC. Revestimentos para barreira térmica: evolução e perspectivas. *Soldagem e Inspeção*. 2014;19(4):353-363. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/S11904.11>.
- [12] Lima CRC, Souza NFC, Camargo F. Estudo das características de revestimentos poliméricos aplicados por aspersão térmica para proteção contra desgaste e corrosão de substratos metálicos. *Soldagem e Inspeção*. 2012;17(4):369-375. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242012000400011>.
- [13] Williamson EH, Gee M, Robertson D, Watts JF, Whiting MJ, Yeomans JA. A comparative study of the wear performance of hard coatings for nuclear applications. *Wear*. 2022;488-489:204124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2021.204124>.
- [14] Lindner T, Löbel M, Grimm M, Fiebig J. Cold gas spraying of solution-hardened 316L grade stainless steel powder. *Metals*. 2021;12(30):30. <http://dx.doi.org/10.3390/met12010030>.
- [15] Derelizade K, Rincon A, Venturi F, Wellman RG, Kholobystov A, Hussain T. High temperature (900 °C) sliding wear of CrNiAlCY coatings deposited by high velocity oxy fuel thermal spray. *Surface and Coatings Technology*. 2022;432:432. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.128063>.
- [16] Váz RF, Tristante R, Pukasicwicz AGM, Capra AR, Chicoski A, Filippin CG, Paredes RSC, Henke SL. Welding and thermal spray processes for maintenance of hydraulic turbine runners: case studies. *Soldagem e Inspeção*. 2021;26:e2540. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/S125.40>.
- [17] Silva VC, Paredes RSC. Efeito do pré-aquecimento e de único e múltiplos passes no grau de porosidade, oxidação e microdureza de um revestimento de aço inoxidável duplex depositado por aspersão térmica chama arame. *Soldagem e Inspeção*. 2016;21(4):529-541. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2104.12>.
- [18] Pukasicwicz AGM, de Oliveira FR, Capra AR, Paredes RSC. 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 e Inspeção*. 2012;17(1):65-75. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242012000100010>.
- [19] Memezes DD. Avaliação da resistência à corrosão de revestimentos de alumínio aplicados pelas técnicas de arco elétrico e chama convencional em meio cloreto [tese de doutorado]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2007.
- [20] Liscano S, Gil L, Staia MH. Effect of sealing treatment on the corrosion resistance of thermal-sprayed ceramic coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2004;188-189:135-139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.08.009>.
- [21] Park I-C, Kim S-J. Corrosion behavior in seawater of arc thermal sprayed Inconel 625 coatings with sealing treatment. *Surface and Coatings Technology*. 2017;325:729-737. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.009>.
- [22] Wang Q, Han P, Yin S, Niu W-J, Zhai L, Li X, Mao X, Han Y. Current research status on cold sprayed amorphous alloy coatings: a review. *Coatings*. 2021;11(2):206. <https://doi.org/10.3390/coatings11020206>.
- [23] Sharma RK, Das RK, Kumar SR. Effect of chromium content on microstructure, mechanical and erosion properties of Fe-Cr-Ti-Mo-C-Si coating. *Surfaces and Interfaces*. 2021;22:100820. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100820>.
- [24] Zhang H, Gong Y, Zhang B, Chen X, Fang L, Jin P, Li H. Corrosion and algal adhesion behaviors of HVOF-sprayed Fe-based amorphous coatings for marine applications. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2019;283-290. <https://doi.org/10.1007/s11666-018-0774-3>.
- [25] Luo J, Shi N, Xing Y-Z, Jiang C, Chen Y. Effect of arc power on the wear and high-temperature oxidation resistances of plasma-sprayed Fe-based amorphous coatings. *High-Temperature Materials and Processes*. 2019;38:639-646. <http://dx.doi.org/10.1515/htmp-2019-0003>.
- [26] Pimenta AR, Diniz MG, Perez G, Solórzano-Naranjo IG. Nitrogen addition to the shielding gas for welding hyper-duplex stainless steel. *Soldagem e Inspeção*. 2020;25:e2512. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si25.12>.
- [27] ArcelorMittal. [página da internet]. Belo Horizonte: ArcelorMittal; 2021 [acesso em 18 fev. 2022]. Disponível em: <http://brasil.arcelormittal.com.br/>
- [28] Gomes DL, Cardoso BR, Furtado HC, Diniz MG. Characterization of fly ash and a protective coating for brazilian thermal power plant boilers. *Materials Research*. 2020;23(6):e20200257. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2020-0257>.
- [29] International Organization for Standardization. ISO 8501-1: Preparation of Steel Substrates Before Application of Paints and Related Products. Geneva: ISO; 2007.
- [30] VGK. [página da internet]. 2017 [acesso em 18 fev. 2022]. Disponível em: www.vgk.com.br.
- [31] Paciornik S, Mauricio MHP. Digital Imaging. ASM handbook vol9 Metallography and microstructures, Ohio: ASM International; 2004.
- [32] Gonzales RC, Woods RE. Digital image processing. London: Pearson; 2017.
- [33] Newbury DE, Ritchie NWM. Electron-excited x-ray microanalysis by energy dispersive spectrometry at 50: analytical accuracy, precision, trace sensitivity, and quantitative compositional mapping. *Microscopy and Microanalysis*. 2019;25(5):1075-1105. <http://dx.doi.org/10.1017/S143192761901482X>. PMID:31439058.

-
- [34] Goldstein JI, Newbury DE, Michael JR, Ritchie NWM, Scott JHJ, Joy DC. Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis. 4th ed. USA: Springer; 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>.
- [35] Shewmon PG. Diffusion in solids. 2nd ed. Warrendale: Minerals, Metals, and Materials Society; 1989.
- [36] Belém MJX, Fals HC, Lima CRC. Avaliação da resistência à oxidação de camadas de ligação de revestimentos utilizados em barreiras térmicas. Soldagem e Inspeção. 2015;20(4):479-488. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2004.14>.