AVALIAÇÃO DE CORROSÃO DO REVESTIMENTO DE COMPÓSITO PENTÓXIDO DE NIÓBIO E ALUMÍNIO APLICADO POR ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA A PÓ

Larissa Ribas dos Santos[1](larissaribasdossantos@gmail.com), Ramón Sigifredo Cortés Paredes [1] (ramon@ufpr.br), José Maurilio da Silva [2] (mauriliopcdegrelhas@gmail.com), Rullian Ferreira Pinheiro [2] (rullianpinheiro@hotmail.com), Gustavo Bavaresco Sucharski [3] (gustavobavaresco@gmail.com)

[1] Universidade Federal do Paraná (UFPR), Departamento de Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Curitiba (PR)
[2] Institutos Lactec, Curitiba (PR)
[3] Revesteel Metalização, Curitiba (PR)

RESUMO: *O pentóxido de nióbio (Nb2O5), com o seu alto ponto de fusão pode ser uma escolha para aplicação em ambientes com temperaturas elevadas e que estão propícias à corrosão. Algumas alternativas deste material misturado com alumínio trazem a possibilidade de redução da corrosão pelo desgaste e degradação a altas temperaturas. Sendo assim, este trabalho teve por objetivo avaliar os revestimentos de aspersão térmica pelo processo chama a pó. Os revestimentos foram avaliados com o aumento da concentração de pentóxido de nióbio, com o tratamento térmico e com a distância da pistola do jato na aplicação do compósito alumínio/pentóxido de nióbio. As amostras aspergidas foram imersas em uma solução de 3,5 % de cloreto de sódio para o ensaio eletroquímico de polarização potenciodinâmica anódica com os resultados comparativos a partir do potencial de proteção dos pites formados. Os revestimentos foram comparados através da metodologia Taguchi nas proporções de 40wt%Al/60wt%Nb2O5 e 60wt%Al/40wt%Nb2O5, sem e com tratamento térmico e, distâncias de aplicação de 150 mm e 250mm. A partir do potencial de proteção dos pites formados verificou-se que, a maior influência benéfica dos parâmetros nos resultados foi o aumento da porcentagem do pentóxido de nióbio, com tratamento térmico e distância de 150 mm.*

PALAVRAS-CHAVE: *REVESTIMENTO; ASPERSÃO TÉRMICA; FLAME SPRAY; CORROSÃO; NB_2O_5/AL*

CORROSION EVALUATION OF THE NIOBIUM PENTOXIDE AND ALUMINUM COMPOSITE COATING DEPOSITED BY FLAME SPRAY

ABSTRACT: *Niobium pentoxide (Nb2O5), with its high melting point, can be a choice for components application high-temperature environments and are prone to corrosion. Some alternatives with this material and aluminum may reduce wear-corrosion and degradation at elevated temperatures. Therefore, the objective of this study was to evaluate thermal spray coatings using the flame spray (FS) process, and the specimens were evaluated between parameters difference of increase of niobium pentoxide concentration, the distance of the spray nozzle gun in the application of the coating, and the heat treatment. The sprayed samples were immersed in a 3.5% sodium chloride solution for the electrochemical test of potentiodynamic anodic polarization with comparative results based on the protection potential of the pits formed. The coatings were compared using the Taguchi methodology at the rates of concentration 40wt%Al/60wt%Nb2O5 and 60wt%Al/40wt%Nb2O5, with and without heat treatment (300°C) and nozzle gun distances of 150 mm and 250 mm. From the protection potential of the pitting formed, it was found that the most beneficial influence of the parameters on the results was the increase in the percentage of niobium pentoxide, with the heat treatment and distance of 150 mm.*

KEYWORDS: *COATING, THERMAL SPRAY, FLAME SPRAY, CORROSION, NB_2O_5/AL .*

1. INTRODUÇÃO

Os materiais, como os aços, estão sujeitos a deterioração, sendo um dos modos por ação eletroquímica (corrosão). Este fenômeno ocorre normalmente de forma superficial, e seu controle é, geralmente por alteração da superfície ou substituição do material, através de uma barreira protetora ou uma superfície de sacrifício, ou as duas (Paredes,1998).

Desse modo, as demandas por novos materiais que podem lidar com um meio ambiente mais agressivo, e também, que possuam estabilidade térmica são desejadas. Os revestimentos de nióbio e pentóxido de nióbio que visam proteção por barreira térmica, podem ser uma excelente alternativa para a redução de custos com o reparo de danos causados por corrosão, através da melhoria na proteção de equipamentos (Hidalgo et al., 1997; Israelsson,2014; Mariano,2008).

Outra alternativa é o desenvolvimento de materiais, como os baseados em alumínio, que propõem a melhora do potencial de superfícies revestidas (Kumar *et. al*. 2021), pois os revestimentos metálicos (os quais são mais ativos que aços) como Al, Zn, e suas ligas fornecem proteção para o substrato de aço por trabalhar como um ânodo de sacrifício, pois quando Al e aços são unidos e expostos juntos a atmosfera salina e água de mar, o revestimento de alumínio atua anodicamente produzindo um efeito adicional de proteção (Paredes,1998;Chaliampalias *et al.*,2008; (Syrek-gerstenkorn *et al.,* 2020).

A busca de materiais como revestimento que possuem propriedades diferenciadas para diversas aplicações, destacando-se os materiais compósitos, vem aumentando nos últimos anos (Freitas *et al.*, 2009). Estes materiais denominados compósitos possuem propriedades com variação ao longo do perfil devido a heterogeneidade de dois ou mais materiais (Udupa *et al.*, 2014; Kumar *et. al.* 2021).

Diante dos novos estudos para redução de ações corrosivas, um fator relevante durante as pesquisas são as análises dos comportamentos de materiais em ambientes susceptíveis a corrosão. Através de ferramentas de mensuração de potencial, sendo uma delas, o ensaio de potencial por pite pela técnica de polarização anódica, podem contribuir para avaliações de materiais para futuras aplicações. Nesta técnica é possível conhecer em laboratório o comportamento eletroquímico de um material, ou seja, a sua tendência a permanecer ativo ou a passivar-se pela construção de curvas de potencial em função da corrente. A susceptibilidade ao pite também está relacionada com a área do laço sob a curva de polarização e, assim, quanto maior a área do laço sob a curva, mais susceptível à corrosão por pite será o material (Mariano *et al.*, 2006; Rodriguez, 2003).

O uso dos processos de aspersão térmica para realização de revestimentos para barreira de corrosão são uma opção (Paredes,1998) e os fatores para uma escolha de um revestimento específico e/ou processo de aspersão térmica (AT) dependem do custo que poderá ser tolerado para a aplicação (Fauchais *et al*., 2014), além da viabilidade do processo (Lima e Guilemany, 2007). Das

opções de materiais a serem utilizados na aspersão, os materiais cerâmicos aspergidos termicamente, comumente são necessários o uso de uma camada de ligação metálica entre o revestimento cerâmico e o substrato metálico para melhoria de aderência devido a diferença de dilatação dos materiais que ocorre durante a deposição via AT (Lima e Guilemany,2007) e a posterior exposição as condições de serviço devido a altas temperaturas (Viswanathan *et al.*, 2019).

Dentre os processos de aspersão térmica, destaca-se o processo de aspersão térmica por chama a pó (Flame Spray), que possui altas taxas de deposição e eficiência e relativa facilidade de operação e baixo custo de manutenção do equipamento (Chaliampalias *et al.*,2008), além da variedade para deposição de materiais, como: metais puros, ligas metálicas, carbonetos, cerâmicos, *cerments* (compósito constituído por metal e cerâmica), materiais poliméricos ou combinações destes (Marques, 2003).

Portanto, este trabalho visa observar a validação dos revestimentos compósitos das misturas de Nb2O5 e Al, dispensando a camada de ligação, além de avaliar as características de processos pelas variações dos procedimentos de deposição através de níveis utilizados pela metodologia Taguchi, com o objetivo de avaliar a melhor condição dos revestimentos por corrosão a pite.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa, foram utilizadas corpos-de-prova de chapas de aço galvanizado com dimensões de 50x70x1mm³ e pós comerciais de alumínio-METCO 54-NS1 (99% de pureza) e Pentóxido de Nióbio de -Grau Ótico-CBMM (99,8% de pureza). Os pós foram peneirados para obtenção da faixa granulométrica de 63µm-106µm para utilização do processo de aspersão térmica a chama com a pistola 6PII. Dessa maneira, os pós foram submetidos nas peneiras da marca Tyler e acopladas a máquina vibratória CT-025 Vibrotec para separação necessária (Mariano,2008).

Para o planejamento experimental com o Método Taguchi, observou-se a necessidade de uma menor quantidade de parâmetros e níveis devido as restrições do tempo de pesquisa, por isso foi utilizado o arranjo ortogonal L4 (quatro experimentos com três parâmetros variando dois níveis), como mostra a Tabela 1. Nele, avaliou-se a influência de proporções de massa de $\%Nb_2O_5$ e %Al, distância (d) de deposição e a influência do tratamento térmico posterior (TT) à deposição do revestimento (AS). O tratamento térmico proposto neste estudo, teve por objetivo avaliar a estabilidade térmica do compósito, e também, verificar a influência da oxidação do revestimento no ensaio de corrosão, pois no estudo realizado por Mariano (2008), foi constatado através de teste qualitativo, a estabilidade térmica a 300°C do revestimento aspergido termicamente de pentóxido de nióbio.

TABELA 1. Parâmetros e níveis dos revestimentos depositados

Nomes das amostras	Proporções de misturas	Distância	Tratamento térmico posterior
6N4A-15SA	Nb_2O_5-40wt%Al	150 mm	Sem aquecimento
6N4A-2530	Nb_2O_5-40wt%Al	250 mm	Pós-aquecido a 300°C
4N6A-1530	Al-40wt%Nb_2O_5	150 mm	Pós-aquecido a 300°C
4N6A-25SA	Al-40wt%Nb_2O_5	250 mm	Sem aquecimento

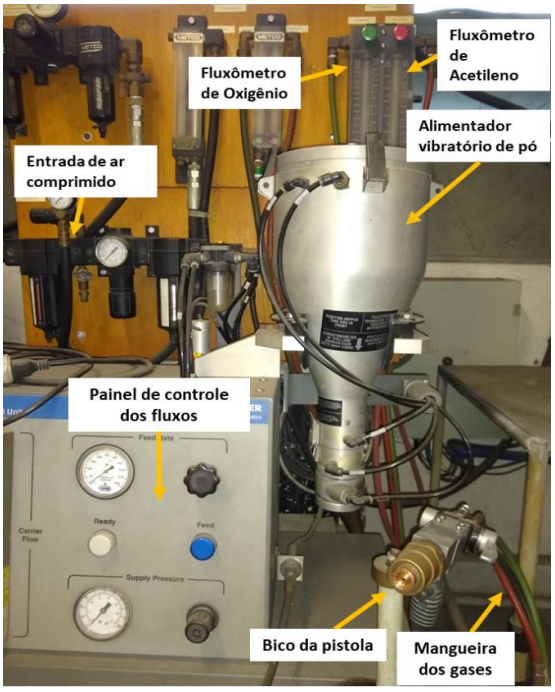
Fonte: Autor (2022)

Cada proporção mássica apresentada no parâmetro de proporções de misturas, como indicadas na Tabela 1, resultou em 400g de misturas dos pós, sendo estes pesados na Balança Analítica Eletronica BG 2000 Gehaka. Subsequentemente os pós misturados foram colocados no misturador em formato de Y em uma máquina rotativa com acoplamento que fez a rotação de 12rpm por uma hora, com o propósito de gerar uma maior homogeneidade das misturas.

A preparação de superfície nos substratos do tipo limpeza Sa3 e rugosidade para adesão dos revestimentos, conforme a norma PETROBRÁS 2568/18, foi obtida com o uso o óxido de alumínio marrom com a granulometria de 0,841 mm na câmara de jateamento CMV. As rugosidades após realizadas foram medidas com o rugosímetro portátil Mitutoyo, modelo SJ201.

Para o processo de aspersão térmica, a pistola utilizada foi do tipo 6P-II da marca Sulzer Metco do Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais (LABATS) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) (Figura 1).

FIGURA 1. Equipamento de aspersão térmica chama a póz



Fonte: Autor (2021)

Nas aplicações dos revestimentos, os parâmetros de processo como: fluxo do acetileno e oxigênio para a combustão, fluxo do ar comprimido, argônio, distância e passes de aplicação e fluxo de gás argônio foram mantidos constantes (Tabela 2) para não exercerem influências das variáveis de processo sobre os resultados dos revestimentos. O valor para o pré-aquecimento utilizado foi de 120° C e efetuou-se através de um maçarico e medido com um pirômetro.

TABELA 2. Parâmetros de processo determinados para realização dos revestimentos

Parâmetros	Valores
Taxa de alimentação	35 g/min
Pré-aquecimento	120°C
Fluxo de Argônio	0,42 m^3 /h
Fluxo de Acetileno	1,13 m^3 /h
Fluxo de Oxigênio	2,26 m^3 /h
Número de passes	4↔↕ (4 horizontais e 4 verticais)

Fonte: Autor (2022)

Como apresentado no planejamento experimental no método Taguchi e apresentado na tabela 1, o tratamento térmico posterior proposto nas amostras 6N4A-2530 e 4N6A-1530 ocorreu após a realização dos revestimentos. As amostras foram colocadas no forno elétrico resistivo mufla BTF-1100C e foram submetidas a taxa de aquecimento de 20ºC/min até chegar à temperatura de 300°C. Ao chegar à temperatura pretendida, as amostras permaneceram por seis horas, e em seguida, foram resfriadas no dentro do forno para evitar desplacamentos dos revestimentos. Após resfriadas realizou-se o ensaio de corrosão. As amostras que não tiveram tratamento térmico posterior a 300°C foram sinalizadas nos gráficos de resultados como temperatura de 25°C.

Para o ensaio de corrosão, o procedimento de polarização foi iniciado após 3 minutos de imersão do corpo de prova (cp). Durante este período foi monitorado o potencial de corrosão (E_{cor}) em relação a um eletrodo de referência de prata/cloreto de prata saturado (Rodriguez,2003).

O teste foi feito para avaliação de propensão a pite do material nos revestimentos e utilizou os parâmetros conforme norma ASTM G5 -94, usando a velocidade de varredura de 5 mV/s e em uma solução de 3,5% KCl, e o uso da norma ASTM G61-86, sobre o método de teste para conduzir medições de polarização potenciodinâmica cíclica.

Nesta norma, a técnica potenciodinâmica é frequentemente estendida para a técnica de polarização potenciodinâmica cíclica, pela qual, além do potencial de pite, pode-se também determinar o potencial de repassivação ou potencial de proteção (Epp) dos pites recém-formados durante o ensaio potenciodinâmico anódico. Essa técnica consiste inicialmente no mesmo

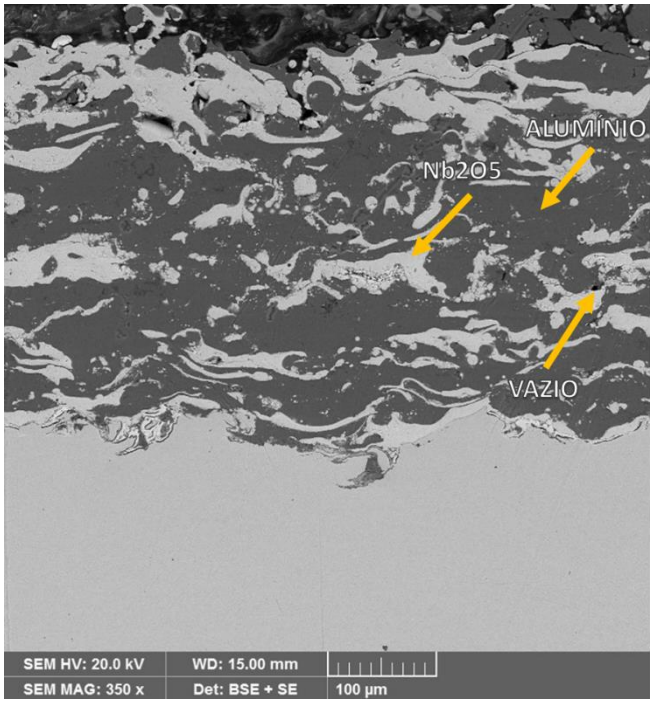
procedimento de polarização anódica e quando a densidade de corrente, após um aumento brusco, atinge um determinado valor, faz-se a reversão da direção da varredura de potencial no sentido contrário ou sentido catódico. Com isso a corrente, em geral, volta a diminuir. Com a evolução a valores de potenciais mais catódicos a curva descendente cruza com a curva ascendente (obtida durante a varredura de potencial na direção anódica). O potencial de proteção dos pites recém-formados durante a varredura anódica, corresponde ao potencial em que a curva descendente (varredura catódica) cruza com a curva ascendente (varredura anódica).

Também, o equipamento utilizado para a imagem do revestimento via MEV foi o VEGA3 TESCAN da Universidade Federal do Paraná.

3. RESULTADOS

O jateamento com abrasivo resultou em rugosidades média (Ra) de 7,08±0,74µm. condizente com a faixa entre 2,5 a 13 µm de Ra como adequada (Lima e Trevisan, 2007). Após o processo de aspersão térmica, analisou-se as características dos revestimentos, como mostrado na Figura 2.

FIGURA 2. Caracterização dos revestimentos de Nb2O5 e Al da 6N4A-2530 via MEV



Fonte: Autor (2022)

Na imagem da amostra 6N4A-2530, é possível observar a estrutura compatível com microestruturas produzidas por AT, onde as lamelas de Nb_2O_5 se encontram no tom mais claro e o alumínio no tom mais escuro, como indicado na figura 2.

Além dos materiais, nota-se partículas que foram fundidas e não fundidas durante a exposição

a temperatura do processo na transferência do bico da pistola até o substrato, além de oxidações das lamelas, deformações das lamelas devido ao impacto no substrato pelo gás de arraste (Davis *et al.*,2004) e os vazios, que são comuns no processo de aspersão.

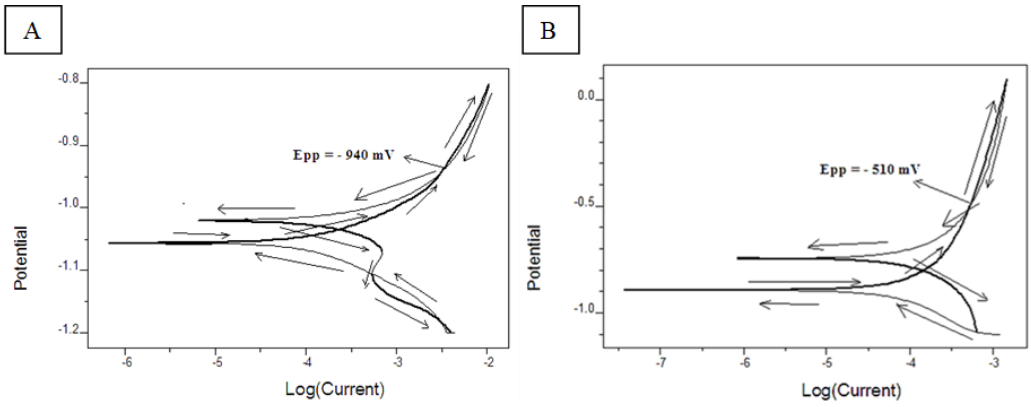
Os revestimentos para o ensaio de corrosão foram medidos e as espessura resultantes foram entre 270 e 430 µm. Deste modo, as amostras foram aceitas para o ensaio, pois a norma Petrobrás 2568/18 menciona espessuras superiores a 250 µm para ambientes corrosivos. Ainda, nenhuma amostra apresentou trincas ou desplacamentos visíveis que comprometesse o comportamento das curvas apresentadas, ou seja, validando a estabilidade térmica do revestimento.

Posteriormente, para analisar os revestimentos de compósitos com um comparativo de base, realizou-se uma amostra 100% com Nb_2O_5 com os parâmetros: distância de aplicação de 150 mm, sem camada de ligação, sem tratamento térmico posterior a deposição. Devido às limitações de processos e a diferença de dilatação entre o revestimento e o substrato, a amostra obtida foi com a espessura do revestimento de ±100 µm.

Nos ensaios primeiramente analisou-se os valores dos potenciais de repousos obtidos para o substrato de aço galvanizado com e sem revestimentos contendo o compósito Al/Nb_2O_5. O procedimento de polarização foi iniciado após 3 minutos de imersão do corpo de prova (cp). Durante este período foi monitorado o potencial de corrosão (Ecor) em relação a um eletrodo de referência de prata/cloreto de prata saturado. O potencial de repouso do aço galvanizado (utilizado como substrato para o revestimento do pentóxido de nióbio) apresentou valores próximos de – 1000 mV. O potencial de repousos para o substrato contendo apenas o revestimento de Nb_2O_5, apresentaram valores próximos de – 900 mV. Este valor de potencial mais nobre que o potencial de repouso do substrato sem revestimento (- 1000 mV) é um indicativo de que o revestimento de nióbio deixa a substrato mais nobre e mais resistente ao processo corrosivo, quando imerso em solução de 3,5 % de cloreto de potássio.

Pela análise do substrato para parametrização do ensaio, a obtenção da voltametria e/ou da potenciodinâmica anódica para o aço galvanizado imerso em 3,5 % de cloreto de potássio (KCl), ou KCl 0,5 M foi realizada com o potencial inicial de – 1200 mV em relação ao eletrodo de referência prata/cloreto de prata saturado.

FIGURA 3. Curvas potenciodinâmicas anódicas para a) Aço galvanizado em 3,5 % de KCl ou KCl 0,5M e b) Aço galvanizado revestido com 100 % de Nb_2O_5



Fonte: Autor (2022).

Nas análises dos resultados, os pites podem ser confirmados pela curva potenciodinâmica anódica, e ao plotar E em função de log i, obtém-se a potenciodinâmica anódica para o aço galvanizado imerso em 3,5 % de KCl ou KCl 0,5 M, conforme mostra a figura 3a.

Quando a curva de retorno cruza a curva de ida, como é apresentado na figura 3a, tem-se o potencial de proteção do pite recém-formado (Epp). A Figura 3a mostra que o potencial de proteção dos pites recém-formados para o substrato metálico estudado está localizado em -940 mV.

A obtenção da potenciodinâmica anódica para o aço galvanizado revestido com 100 % de Nb_2O_5, sem tratamento térmico e com distância de 150 mm, pode ser visto na Figura 3b.

Ao comparar a Figura 3a com a Figura 3b, verifica-se que o potencial de proteção dos pites recém-formados durante a potenciodinâmica anódica, evolui para valores de potenciais mais nobres ou positivos (saindo de – 940 mV, indo para – 510 mV) quando o revestimento é de 100 % de Nb_2O_5. Isto mostra o carácter benéfico do revestimento de pentóxido de nióbio quando adicionado na superfície do aço galvanizado.

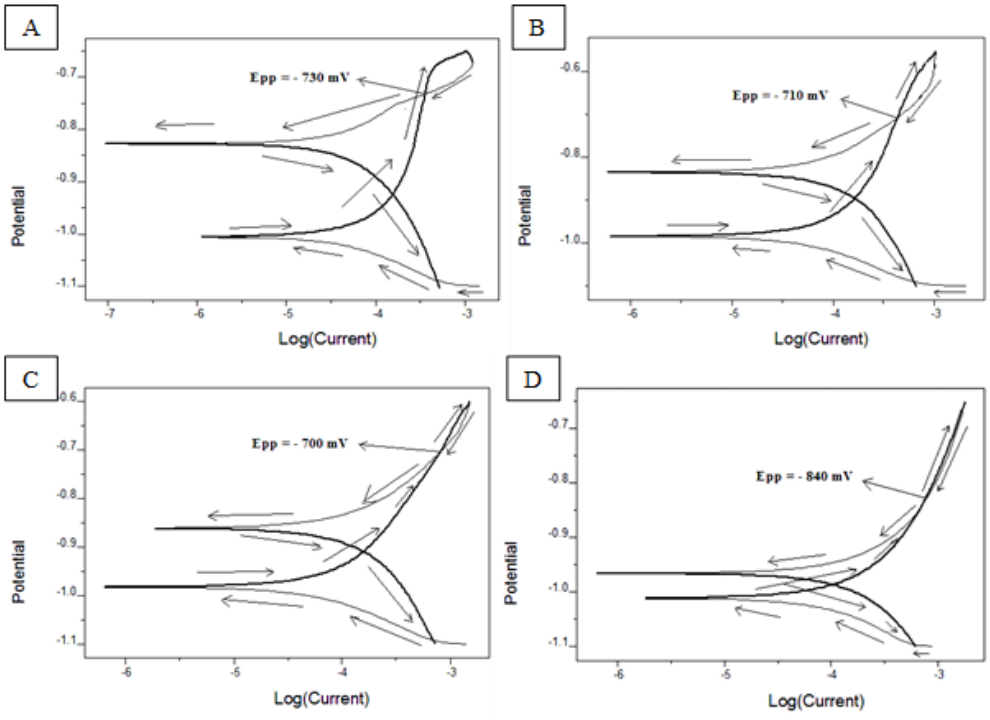
A melhoria verificada na Figura 3b, se deve pelo fato de que, a formação dos pites começa próximo de – 800 mV (vide Figura 3a). Na Figura 3b, a formação dos pites começa acontecer, somente após + 100 mV. Isto mostra que o revestimento de nióbio dificultou o aparecimento dos pites. Estes pites recém-formados ficam protegidos em – 510 mV (vide Figura 3b), ou seja, este potencial é bem mais nobre que o potencial de – 940 mV, verificado na Figura 3a.

A obtenção da voltametria e/ou da potenciodinâmica anódica para os revestimentos contendo compósito Al/Nb_2O_5 imerso em 3,5 % de cloreto de potássio (KCl), ou KCl 0,5 M, estão apresentados na Figura 4. Nestes experimentos o potencial inicial foi de – 1 100 mV e medido em relação ao eletrodo de referência de prata/cloreto de prata saturado. O potencial de vértice variou na medida em que apareciam os pites e a velocidade de varredura foi de 5 mV/s.

Conforme os resultados apresentados na Figura 4, a curva resultante da amostra 6N4A-15SA (40:60, sem TT e d = 150 mm) exibe que o potencial de proteção dos poros passantes recém iniciados encontra-se em – 730 mV. Para a amostra 6N4A-2530 (40:60, com TT e d = 250 mm), o resultado foi

de – 710 mV, e para a amostra 4N6A-1530 (60:40, com TT e d = 150 mm), o potencial de proteção foi de – 700 mV. Da mesma forma, a amostra 4N6A-25SA (60:40, sem TT e d = 250 mm), foi medido e encontrado – 840 mV.

FIGURA 4. Curvas potenciodinamicas anódicas das amostras em 3,5 % de KCl ou KCl 0,5M: (A)6N4A-15SA, (B)6N4A-2530, (C)4N6A-1530, (D) 4N6A-25SA



Fonte: Autor (2022).

A Figura 4 mostra três benefícios que o revestimento de nióbio aufere no substrato. O primeiro benefício está relacionado com o teor de pentóxido de nióbio no revestimento. O segundo benefício está relacionado com o tratamento térmico em 300 °C após a deposição, enquanto o terceiro benefício foi verificado quando a aplicação do revestimento realizado foi mantendo a distância da pistola em 150 mm.

O teor de pentóxido de nióbio fica evidente quando comparamos as Figura 3b com a Figura 4a. Na Figura 3b a amostra de aço galvanizado foi revestida com 100% de Nb_2O_5, sem TT e d=150 mm, enquanto que na Figura 4a, a amostra de aço galvanizado foi revestida com 40% de alumínio e 60% de Nb_2O_5, sem TT e d=150 mm. Ao comparar essas duas Figuras, fica evidente o carácter benéfico (pelo potencial de proteção de pite) na Figura 3b, ao aumentar o teor de pentóxido de nióbio de 60% para 100%.

O teor de pentóxido de nióbio também fica evidente quando comparamos as Figura 4a com a Figura 4d. Na Figura 4a, a amostra de aço galvanizado foi revestida com 40 % de Al e 60 % de Nb_2O_5, sem TT, enquanto na Figura 4d, a amostra de aço galvanizado foi revestida com 60% de alumínio e

40% de Nb_2O_5, sem tratamento térmico. Ao comparar essas duas Figuras, fica evidente o carácter benéfico (pelo potencial de proteção de pite) na Figura 4a, ao aumentar o teor de pentóxido de nióbio de 40 % para 60 %.

O poder benéfico do tratamento térmico em 300°C, fica evidente quando se comparam as Figuras 4a com a 4b e quando se comparam as Figuras 4c com a 4d. Ao comparar as Figuras 4a e 4b, observa-se que o potencial de proteção dos pites, evolui à valores mais nobres (passando de – 730 mV para – 710 mV) com a introdução do tratamento térmico. Do mesmo modo, ao comparar as Figuras 4d com a 4c, observa-se que o potencial de proteção de pites evolui à valores mais nobres (passando de – 840 mV para – 700 mV) com a introdução do tratamento térmico na Figura 4c.

O poder benéfico da distância do bico do jato em 150 mm é verificado ao comparar as amostras contendo o tratamento térmico (Figura 4b e Figura 4c). Enquanto a Figura 4b (250 mm de distância) apresenta potencial de proteção de pite de – 710 mV, a Figura 4c (150 mm de distância) apresenta potencial de proteção de pite mais nobre (- 700 mV) evidenciando a melhoria do revestimento em 150 mm de distância do substrato, como apresenta a Tabela 3.

TABELA 3. Valores obtidos do potencial de proteção do pite recém-formado (Epp) das amostras realizadas por Aspersão Térmica Chama a Pó

Nome da amostra	Proporções de mistura	Distância	Tratamento térmico posterior	Epp (mV)
6N4A-15SA	Nb2O5-40wt%Al	150 mm	Sem aquecimento	-730
6N4A-2530	Nb2O5-40wt%Al	250 mm	Pós-aquecido a 300°C	-710
4N6A-1530	Al-40wt%Nb2O5	150 mm	Pós-aquecido a 300°C	-700
4N6A-25SA	Al-40wt%Nb2O5	250 mm	Sem aquecimento	-840
	100%Nb2O5	150 mm		-510

Fonte: Autor (2022)

Outro estudo sobre a influência de proporções de mistura dos compósitos que contêm alumínio (Al) foi o de Jumah e Ahmed (2021), que examinaram a influência de proporções de alumina (Al_2O_3) no Al como revestimento realizado por aspersão chama a pó para análise de corrosão. Na preparação de misturas dos compósitos, foi estabelecido entre 0% e 20% de Al_2O_3 sobre peso no Al, e assim, aspergidos aos substratos. Logo após, os ensaios de corrosão foram feitos eletroquimicamente pelo método potenciodinâmico com a solução de NaCl (3.5M) e resultaram potenciais de corrosão com o potencial elétrico de -1275mV para o revestimento de apenas Al, e -1063mV que continha 20% Al_2O_3. Portanto, a adição da alumina aumentou a resistência a corrosão.

Ao observar os resultados dos ensaios, para apurar as influências dos fatores utilizados no

método Taguchi, a Tabela 4 expõe as ordens dos parâmetros que tiveram como consequência o desempenho das amostras.

TABELA 4. Ranque de influências no Método Taguchi dos parâmetros sobre os resultados potenciodinâmicos anódicos

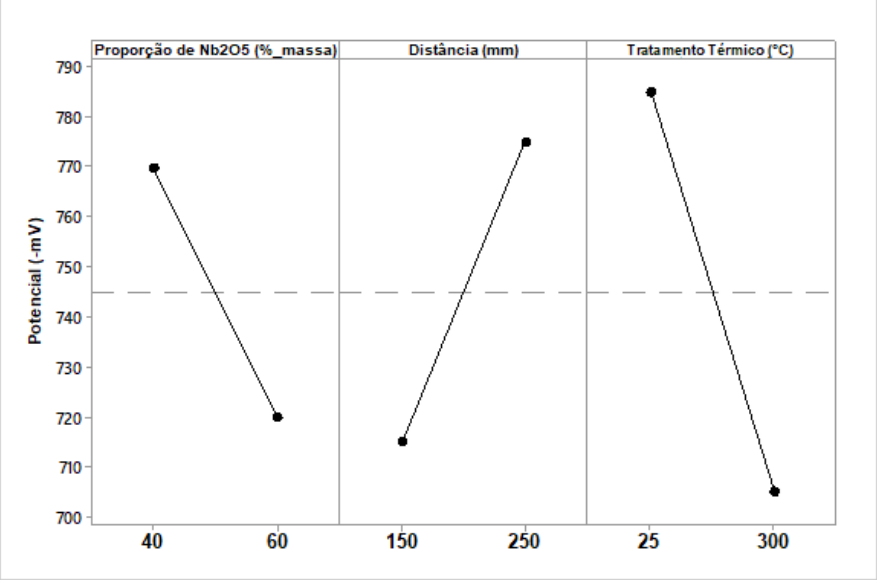
Nível	Proporção de Nb2O5 (%_massa)	Distância (mm)	Tratamento Térmico posterior (°C)
	770,0	715,0	785,0
	720,0	775,0	705,0
Delta	50,0	60,0	80,0
Ranque	3	2	1

Fonte: Autor (2022)

Dos parâmetros utilizados, é possível constatar que o tratamento térmico foi o que apareceu com o número 1 no ranque, portanto, foi o que mais influenciou nos resultados das amostras.

Para verificar quais níveis favoreceram em um melhor desempenho no ensaio de corrosão, é exibido na figura 5.

FIGURA 5. Gráfico de análise de influências dos parâmetros e níveis sobre os resultados potenciodinâmicos anódicos



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 5, para os menores valores no eixo Y apresentados, os níveis de 60% de Nb_2O_5, distância de 150 mm e tratamento térmico de 300°C são os níveis que favoreceram em uma melhor qualidade do revestimento, portanto, conclui-se as possíveis causas para estes resultados: o aumento

do óxido protetivo com o tratamento térmico (Morales *et al*., 2019) e menores orientações para corrosão por causa da menor porosidade devido a redução da distância.

Regis (2011), em sua pesquisa com revestimento por aspersão térmica chama a pó de Nb_2O_5+Al, obteve valores para potencial de corrosão (Ecorr(mV)) para vários solos, com os resultados para o revestimento de -772 mV para o solo Castro, -717mV para o solo Curitiba, -757 mV para o solo Dona Francisca e - 773 mV para o solo Quarto Centenário, sendo os dois últimos ficaram próximos do aço usado com substrato sem revestimento no teste. Também, foi constatado que o potencial de corrosão do substrato nos solos foi mais catódico que o revestimento.

Em outro teste de corrosão, como o estudo de Serenario *et al.* (2022), foi realizada a comparação em substratos de aço SAE 1020 de revestimentos Nb_2O_5 aplicados por Flame Spray com uma camada de ligação de NiAl e uma tinta epóxi a base de Nb_2O_5. No teste proposto, as amostras foram parcialmente imersas no laboratório por períodos 720h e 1440h em uma solução de 40% (v/v) H_2SO_4 a 25°C, 60°C e 80°C, e foi verificado que houve degradação das amostras com aumento da temperatura. Quando comparados os revestimentos, os aspergidos termicamente apresentaram resistência superior a corrosão do que as com tinta.

4. CONCLUSÕES

A partir dos testes realizados nos revestimentos com o compósito de Nb_2O_5 e Al aplicados por aspersão térmica a chama a pó, variando proporções de elementos, distância e tratamento térmico após a deposição do revestimento, conclui-se:

- A mistura de materiais e os parâmetros para o processo de aspersão térmica propostos em um substrato de aço galvanizado para esta pesquisa obteve revestimentos viáveis, sem a necessidade do uso de camada de ligação, que tem como objetivo ser usado entre substratos metálicos e revestimento cerâmicos.

- Com as análises de microestrutura do revestimento, observou-se que as lamelas de pentóxido de nióbio e alumínio eram heterogêneas e com boa dispersão em todo o revestimento.

- Amostra com o revestimento 100% de pentóxido de nióbio obteve o melhor resultado entre todas as amostras.

- Referente aos revestimentos compósitos, a amostra 4N6A-1530 foi que obteve melhor comportamento, e quando analisado as influências dos parâmetros pelo método Taguchi, a maior proporção de Nb_2O_5, a distância de aplicação de 150 mm e o tratamento térmico após a deposição em 300°C foram o que beneficiaram a maior resistência a corrosão.

- Diante dos dados apresentados através dos ranqueamentos de análise do método Taguchi para os compósitos, conclui-se que a principal influência foi o tratamento térmico de 300°C quando apresentados os resultados do ensaio de polarização potenciodinâmica anódica.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM G5-94). Standard reference test method for making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurements -Designation G5 - 94. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia: 1994 v.03.02

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM G61-86(2014): Standard Test Method For Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements For Localized Corrosion Susceptibility Of Iron-, Nickel-, Or Cobalt-Based Alloys. West Conshohocken, 2018.

LIMA, C. C., TREVISAN, R. Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicações. São Paulo: Artliber, 2 ed. 2007.

CHALIAMPALIAS, D. et al. High temperature oxidation and corrosion in marine environments of thermal spray deposited coatings. Applied Surface Science, v. 255, n. 5, p. 3104-3111, 2008.

DAVIS, Joseph R. et al. (Ed.). Handbook of thermal spray technology. ASM international, 2004.

FAUCHAIS, P. L.; HEBERLEIN, J. VR; BOULOS, M. I. Industrial applications of thermal spraying technology. In: Thermal spray fundamentals. Springer, Boston, MA, 2014. p. 1401-1566.

FREITAS, M. et al. Preparação e caracterização de materiais compósitos SiC/caulim/Al via" squeeze-casting". Cerâmica, v. 55, p. 271-280, 2009.

HIDALGO, V. H.; VARELA, FJ.; RICO, E. F.. Erosion wear and mechanical properties of plasma-sprayed nickel-and iron-based coatings subjected to service conditions in boilers. Tribology International, v. 30, n. 9, p. 641-649, 1997.

ISRAELSSON, N.. High temperature oxidation and chlorination of FeCrAl alloys. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden), 2014.

JUMAH, Thamir Abdul-Jabbar; AHMED, Saad Ali. Neural Network Model for Synthesis of Thermally Sprayed (Al/Al2O3) Composite Protective Coatings. In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. p. 012013.

KUMAR, SN N. et al.. Review on aluminium based functionally graded composites. Materials Today: Proceedings, v. 39, p. 1743-1749, 2021.

LIMA, C. R. C.; GUILEMANY, J. M. Adhesion improvements of thermal barrier coatings with HVOF thermally sprayed bond coats. Surface and Coatings Technology, v. 201, n. 8, p. 4694-4701, 2007.

MARIANO, C.. Obtenção de revestimentos de nióbio depositados por aspersão térmica para proteção à corrosão marinha. 2008. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado-UFPR, Curitiba.

MARIANO, N. A. et al. Avaliação da resistência à corrosão em aço inoxidável martensítico do tipo Cr-Ni em meio marinho sintético simulando atividades em águas profundas. Rem: Revista Escola de Minas, v. 59, n. 1, p. 135- 139, 2006.

MARQUES, P. V.. Informação Técnica :Aspersão Térmica. Infosolda, 2003.

MORALES, Alfredo; PIAMBA, Oscar; OLAYA, Jhon. The Corrosion Resistance of Aluminum–Bronze Coatings as a Function of Gas Pressure Used in the Thermal Spraying Process. Coatings, v. 9, n. 8, p. 507, 2019.

PAREDES, R. S. C. Estudo de revestimentos de alumínio depositados por três processos de aspersão térmica para a proteção do aço contra a corrosão marinha. Tese (Doutorado). Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 266 p., 1998.

PETROBRAS. N-2568: Revestimentos metálicos por aspersão térmica -referências - elaboração. Rio de Janeiro, 2018.

REGIS JR, O. Viabilidade dos revestimentos anticorrosivos com Nb2O5/Cu, Nb2O5/Ni, e Nb2O5/Al aplicados por aspersão térmica para estruturas enterradas de linhas de transmissão. 2011. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais)–Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

RODRIGUEZ, R. M. H. P. Formação de óxidos nos revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica. 134 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

SERENARIO, Maria ED et al. Anti-Corrosion Coatings Based on Nb 2 O 5-a Comparison Between two Coatings Technology: Thermal Spray Coating and Epoxy Paint. Materials Research, v. 25, 2022.

SYREK-GERSTENKORN, B; PAUL, S; DAVENPORT, A. J. Sacrificial thermally sprayed aluminium coatings for marine environments: A review. Coatings, v. 10, n. 3, p. 267, 2020.

UDUPA, G.; RAO, S. S.; GANGADHARAN, K. V. Functionally graded composite materials: an overview. Procedia Materials Science, v. 5, p. 1291-1299, 2014.

VISWANATHAN, Vaishak et al. Role of bond coat processing methods on the durability of plasma sprayed thermal barrier systems. Surface and Coatings Technology, v. 375, p. 782-792, 2019.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos são para a CBMM pela doação do Nb_2O_5 utilizado nesta pesquisa, a Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao LABATS, Instituto LACTEC, Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica (PGMEC) da UFPR e sua coordenação, junto com a Agência CAPES-DS que proporcionaram a possibilidade de desenvolvimento desta pesquisa.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores certificam que o presente texto científico não se caracteriza como multipartes e/ou resultados parciais de um mesmo estudo e representa uma pesquisa original. Também, ainda declaram, não haver conflitos de interesse em relação ao presente texto científico, pois são os únicos responsáveis por este trabalho.