

Avaliação da resistência a corrosão da liga de alumínio AA 5052 revestida por plasma eletrolítico

ANA BEATRIZ RAMOS MOREIRA ABRAHÃO

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

ana.abrahao@cps.sp.gov.br

ORCID: 0000-0002-3605-4057

BÁRBARA CARDOSO RANGEL DOS SANTOS

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

barbara.santos14@aluno.cps.sp.gov.br

RAFAEL RESENDE LUCAS

Faculdade de Tecnologia de Cruzeiro

rafael.lucas@cps.sp.gov.br

Resumo

O Alumínio é um material metálico não ferroso com excelentes propriedades mecânicas e baixo peso, usado em diversas áreas como na indústria aeronáutica, aeroespacial e construção civil. Gerando variados tipos de ligas, dentre elas a AA 5052, que se destaca pela facilidade de soldagem, boa conformidade, boa resistência mecânica e a corrosão. A aplicação de revestimentos e tratamentos de superfícies de materiais metálicos se encontra em grande expansão no meio acadêmico para o industrial em que se procura isolar a estrutura metálica do meio corrosivo. Com a utilização correta e análise desses métodos protetivos é possível reduzir os impactos da corrosão no meio ambiente, protegendo recursos naturais, saúde humana e aspectos econômicos. A oxidação eletrolítica a plasma (PEO – Plasma Electrolytic Oxidation) é um tratamento superficial inovador, que se assemelha a anodização convencional, porém com o emprego de potenciais mais elevados. Nesse contexto esse trabalho apresenta um estudo de parâmetros para otimização desse processo de revestimento em alumínio, sendo a avaliação da variável resposta foi obtida por meio de polarização eletroquímica.

Palavras-Chave

Alumínio; Corrosão; Plasma eletrolítico; Revestimento

1. Introdução

O Alumínio é um material metálico não ferroso com excelentes propriedades mecânicas e baixo peso, usado em diversas áreas como na indústria aeronáutica, aeroespacial e construção civil. Gerando variados tipos de ligas, dentre elas a AA 5052, que se destaca pela facilidade de soldagem, boa conformidade, boa resistência mecânica e a corrosão (BARBOSA, 2019).

A aplicação de revestimentos e tratamentos de superfícies de materiais metálicos se encontra em grande expansão no meio acadêmico para o industrial em que se procura isolar a estrutura metálica do meio corrosivo. Com a utilização correta e análise desses métodos protetivos é possível reduzir os impactos da corrosão no meio ambiente, protegendo recursos naturais, saúde humana e aspectos econômicos. Segundo estudos, as propriedades de revestimento do alumínio, como maior aderência e menor porosidade, são mais fáceis de se conquistar com os processos de maior energia, como aspersão térmica, arco elétrico ou a chama de elevada velocidade (LUCAS, 2020).

A oxidação eletrolítica a plasma (PEO – Plasma Electrolytic Oxidation) é um tratamento superficial inovador, que assemelha-se a anodização convencional porém com o emprego de potenciais mais elevados (>100 V), a partir deste potencial os quais ocorrem fenômenos de altos campos elétricos como o caso do aparecimento de micro arcos com isso pode-se aplicar eletrólitos menos agressivos que os empregados em processos convencionais como a anodização dura com o emprego de cromo hexavalente (BARBOSA, B. 2019; FATIMAH, S. et al. 2021; YEROKHIN, A. et al. 2021).

A polarização potencio dinâmica é um método baseado em conceitos eletroquímicos que permite determinar a taxa de corrosão e a susceptibilidade à corrosão de materiais específicos em diferentes meios eletrolíticos. A interface de um metal imerso em uma dada solução pode ser caracterizada a partir de uma relação corrente-potencial (curva $E \times i$) (Neto, 2009). Este trabalho vem apresentar o estudo da resistência à corrosão por meio de técnica de polarização eletroquímica para avaliação de ligas de alumínio revestidas por plasma eletrolítico, analisando as condições de processamento do revestimento como tempo e ciclos de trabalho.

2. Metodologia

2.1. Materiais

2.1.1. Amostras de Liga AA 5052

As amostras utilizadas em sua composição, se destaca o Alumínio como metal principal e o Magnésio, dentre outros elementos. A liga 5052 pode ser encontrada no formato de bobina, chapa e bloco e utilizada nesse trabalho. As amostras foram obtidas por doação do laboratório de plasma do departamento de física da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá-Unesp).

2.2. Métodos

2.2.1 Preparo das amostras para os ensaios

O corte das amostras foi realizado em guilhotina as dimensões equivalentes de corte foram: a 20x20 mm. Após o corte as amostras foram lixadas com lixas de 80 a 1200 mesh. 3.2.2 PEO Para realizar o tratamento de superfície por PEO, foi utilizada uma fonte pulsada (Figura 1), da fabricante T2S TECHNOLOGY, modelo PS-2, que fornece um potencial de 0 – 1000 V, com controle de ciclo de trabalho (15 a 100%). No sistema, foi utilizado também um reostato de 25 ohms para controlar

a corrente no sistema, um Becker de aço inoxidável (304) com volume de 500 ml atuando como cátodo (Figura 2). Para este trabalho foi adotado um ciclo de trabalho de 15%, com concentração do eletrólito (Na_2SiO_3) de 1 g/L, por 120 segundos de tempo de tratamento, o tratamento ocorreu no regime galvanostático, com corrente de 0,03 A. O tempo de tratamento foi iniciado a partir do momento que se constatou a presença de micro arcos na superfície da amostra. Após o processo de tratamento PEO, as amostras foram secas e armazenadas em um dissecador, para futuras análises.



Figura 1 Reostato utilizado para aplicação do revestimento PEO

Fonte: Autores, 2025



Figura 2 Fonte Pulsada acoplada ao Reostato

Fonte: Autores, 2025

2.2.2. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para determinação dos melhores parâmetros do PEO para revestimento da liga de alumínio, foi realizado um planejamento experimental tipo fatorial avaliando-se três variáveis: tempo, concentração de eletrólito e ciclo de trabalho, sendo avaliada como variável resposta a corrente de corrosão para o cálculo de taxa de corrosão, como apresentado na Tabela 1.

Variáveis		Níveis				
Reais	Cód.	- α	-1	0	+1	+ α
Concentração g/L	X1	0,5	1	8	15	20
Ciclo de Trabalho %	X2	15	20	50	80	100,45

Tabela 1. Níveis reais e codificados para as variáveis concentração, ciclo de trabalho e corrente avaliados segundo planejamento experimental para a amostra de alumínio 5052 submetida ao processo de plasma eletrolítico.

Fonte: Autores, 2026

2.2.3. Ensaios eletroquímicos de corrosão

Para a análise de corrosão foram utilizados ensaios eletroquímicos; durante o processo a amostra foi inserida na célula eletroquímica contendo três eletrodos, sendo o eletrodo de trabalho consistindo em amostras de substrato metálico e os diferentes revestimentos, com a área exposta de $0,8 \text{ cm}^2$, o eletrodo de referência (Ag/AgCl, KCl saturado) e dois contra eletrodos de platina (Figura 3). Para a realização dos ensaios, será utilizada uma solução aerada de NaCl 3,5%. Os ensaios serão realizados no equipamento da marca AUTOLAB, modelo PGSTAT 302N (Figura 4).



Figura 3 Célula Eletroquímica
Fonte: Autores, 2025



Figura 4. Potenciostato e gaiola de Faraday
Fonte: Autores, 2025

3. Resultados e discussão

3.1. Análises iniciais para determinação de parâmetros

Para as análises iniciais eletroquímicas foram utilizadas polarização, em quais pode-se por comparação avaliar os valores dos parâmetros do revestimento por plasma eletrolítico estudado. A Figura 5 abaixo apresenta os valores obtidos de corrente e potencial de corrosão para os parâmetros mínimos e máximos para o estudo das amostras revestidas.

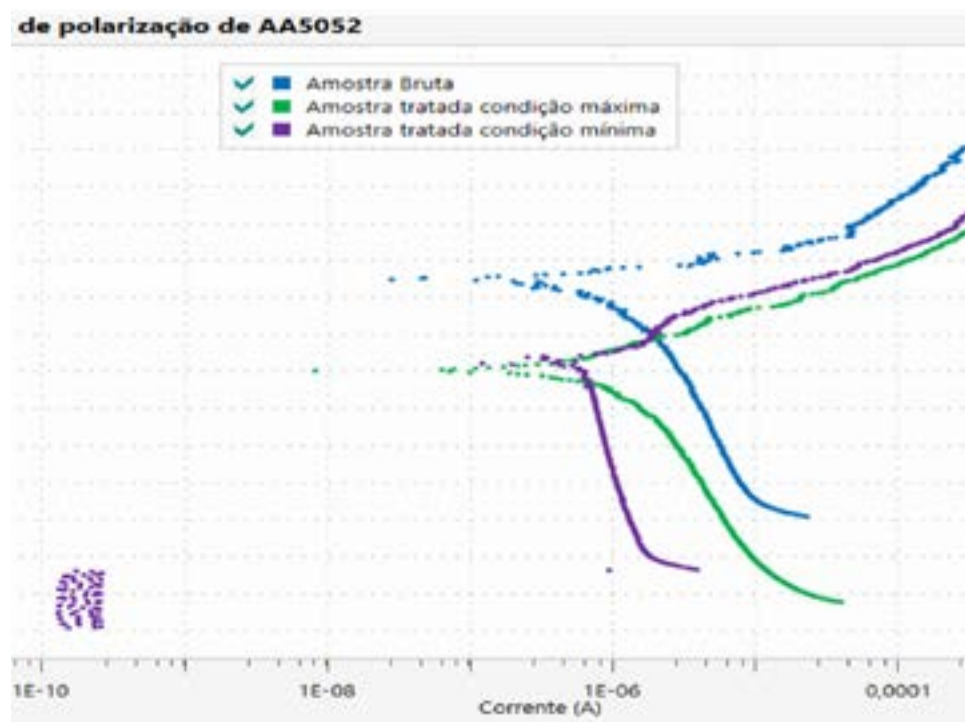


Figura 5. Curva de polarização das amostras bruta e tratadas da liga AA5052.

Fonte: Autores, 2025

Pela avaliação da Figura 5 foi reparado que as amostras tratadas por plasma apresentaram uma maior resistência à corrosão nas duas condições de tratamentos estudadas, sendo os valores de taxa de corrosão obtidos pelo Software da Anova valores de taxa de corrosão para a amostra bruta de 0,02mm/ano e de aproximadamente 0,008 mm/ano das tratadas nas duas condições como apontado na Tabela 2.

Amostras	Ecorr	Taxa de corrosão (mm/ano)
Bruta	-0,52	0,025
Tratada 1 (condição máxima)	-0,65	0,0091
Tratada 2 (condição mínima)	-0,64	0,0089

Tabela 2. Tabelas com potencial e taxa de corrosão das amostras de AA5052.

Fonte: Autores, 2026

Foi observado que os valores de potencial e taxa de corrosão das amostras tratadas forma próximas, entretanto em relação a amostra bruta houve um acréscimo de duas vezes a resistência à corrosão em comparativo com a taxa de corrosão.

3.2. Determinação de parâmetros por planejamento experimental

3.2.1 Avaliação pela análise de variância

Utilizando os resultados obtidos pelo programa estatístico de acordo com os valores encontrados de corrente de corrosão, para cada parâmetro estudado foi possível determinar que o ciclo de trabalho foi relevante para o processo de revestimento.

Os valores de corrente de corrosão encontrados com o planejamento experimental realizado são apresentados pela Tabela 3.

Experimentos	Variável 1 Ciclo de trabalho (%)	Variável 2 Concentração (g/L)	Variável 3 Tempo de tratamento (min)	Variável resposta: corrente de corrosão (A)
1	20	1	2	$3,1075 \cdot 10^{-7}$
2	80	1	2	$4,9505 \cdot 10^{-7}$
3	20	15	2	$6,1955 \cdot 10^{-8}$
4	80	15	2	$1,3815 \cdot 10^{-6}$
5	20	1	5	$6,775 \cdot 10^{-7}$
6	80	1	5	$2,2025 \cdot 10^{-6}$
7	20	15	5	$4,4463 \cdot 10^{-7}$
8	80	15	5	$7,4368 \cdot 10^{-7}$
9	15,00	8	3,50	$8,5622 \cdot 10^{-8}$
10	100,45	8	3,50	$1,5671 \cdot 10^{-7}$
11	50	0,50	3,50	$1,291 \cdot 10^{-6}$
12	50	20	3,50	$4,1794 \cdot 10^{-8}$
13	50	8	1,00	$1,0034 \cdot 10^{-6}$
14	50	8	6,02	$5,5756 \cdot 10^{-6}$
15	50	8	3,50	$1,1746 \cdot 10^{-6}$
16	50	8	3,50	$6,2425 \cdot 10^{-7}$
17	50	8	3,50	$1,7026 \cdot 10^{-7}$
18	50	8	3,50	$3,3999 \cdot 10^{-6}$
19	50	8	3,50	$6,4931 \cdot 10^{-7}$
20	50	8	3,50	$8,103 \cdot 10^{-7}$

Tabela 3. Valores das variáveis e variável resposta de corrente de corrosão do planejamento experimental realizado.

Pela Tabela 3 que apresenta os valores de análise de variância foi observado pelo fator estatístico F que o modelo apresentou significativo de forma quadrática e obteve-se um coeficiente de correlação no valor de 0,78, significando que 78% dos resultados encontrados podem ser descritos por esse modelo estatístico. Adicionalmente foi possível com isso obter com o auxílio do programa os valores das variáveis otimizadas que apontaram o menor valor de corrente de corrosão, ou seja, os valores dos parâmetros para o revestimento ter maior resistência a corrosão. Como mostrado na Tabela 4, os valores em que as condições foram maiores em relação a resistência á corrosão. e pelas Figuras os valores otimizados das variáveis do processo de revestimento por PEO estudadas.

Condições	Ciclo de trabalho (%)	Concentração do eletrólito (g/L)	Tempo de Tratamento (min)	Corrente de Corrosão (A)
Otimizadas	26,57	12,39	3,42	$2.50871.10^{-8}$
Reais	50,00	20,00	3,50	$4,1794 .10^{-8}$

Tabela 4. Condições real e otimizada do processo PEO
Fonte: Autores, 2026

4. Conclusão

Após este estudo foi possível determinar os melhores parâmetros de revestimento por PEO (Plasma Electrolytic Oxidation), em que se obteve a maior resistência á corrosão para a liga AA5052. Adicionalmente foi observado que o parâmetro significativo foi o ciclo de trabalho e sendo possível obter os valores otimizados.

5. Referências

- BARBOSA, B.A.; COSTA, G.B.; SOUZA, M.E.P. **Study of silicate and aluminate coatings obtained by plasma electrolytic oxidation of aluminum alloy**. Revista Matéria, v.24, n.1, 2019. DOI: 10.1590/S1517-707620190001.0620.
- BUTTON, T. S.; **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. Disponível em: <http://chromeextension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://sites.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/IM317/apostila2012.pdf> Acesso em: 22 jun. 2026.
- FATIMAH, S. et al. **Development of anti-corrosive coating on AZ31 Mg alloy subjected to plasma electrolytic oxidation at sub-zero temperature**. Journal of Magnesium and Alloys (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.07.013>.
- FERRARI, J.V. **Estudo da corrosão localizada da liga de alumínio 7475-t761 por espectroscopia de impedância eletroquímica global e local em meio de sulfato de sódio**. p 209. Tese (Doutorado em Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.
- GAO, H. et al. **Effect of Na₂SiO₃ solution concentration of micro-arc oxidation process on lap-shear strength of adhesivebonded magnesium alloys**. Applied Surface Science, Amsterdam, v. 314, p. 447-452, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.apsusc.2014.06.117>.
- LUCAS, R. R.; GONÇALVES, L. L.; SANTOS, D. C. R. **Morphological and chemical characterization of oxide films produced by plasma anodization of 5052 aluminum alloy in solution containing sodium silicate and sodium phosphate**. Revista Brasileira de Aplicações no Vácuo, Rio de Janeiro, v. 39, n. 1, p. 33-41, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.17563/rbav.v39i1.1154>.
- THEOHARI, S. **Effect of temperature on the anodizing process of aluminium-magnesium alloys**. Corrosion. Science, v. 76, p. 125-132, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169433213014529>. Acesso em: 01 dez. 2025.
- YEROKHIN, A. et al. **Adhesive bond strength of PEO coated AA6060-T6**. Surface & Coatings Technology 428 (2021) 127898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127898>.
- WOLYNEC, Stephan. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão** Vol. 49. Edusp, 2003.