

EFEITO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM EM REVESTIMENTOS A BASE DE NÍQUEL NAS MEDIDAS ELETROQUÍMICAS DE CORROSÃO

EFFECT OF WELDING PARAMETERS IN NICKEL-BASED COATINGS ON ELECTROCHEMICAL CORROSION MEASUREMENTS

Paulo Vinícius Lima dos Santos¹
Aureliano Xavier dos Santos²

RESUMO

Os materiais metálicos são amplamente utilizados no meio industrial, dentre eles se destaca o aço API 5L X70, usado para o transporte de petróleo, entretanto, esses aços são susceptíveis ao fenômeno da corrosão devido ao meio agressivo. Com isso, diversas pesquisas são realizadas com o intuito de mitigar o efeito da corrosão. Os processos de soldagem com arame maciço são utilizados para soldagem de revestimento para este fim, contudo, requerem do usuário informações para determinar as condições mais adequadas de soldagem. Objetivou-se neste trabalho, estudar a influência dos parâmetros de soldagem para revestimento a base de inconel 625 nas medidas eletroquímicas de corrosão. Para otimização dos experimentos foi utilizado um planejamento fatorial completo para avaliar os parâmetros de soldagem, velocidade de soldagem e de alimentação. Após as deposições por soldagem, as amostras foram cortadas transversalmente, e feitos cálculos da diluição, e medidas de teor de ferro por EDX. Por fim, para revelar a resistência à corrosão, foi utilizada a técnica eletroquímica por polarização potenciodinâmica linear, através da resistência à polarização, potencial de corrosão, corrente de corrosão. Os resultados mostram que a maior resistência à corrosão dos revestimentos, são encontradas quando são utilizados o maior nível de velocidade de soldagem e menor nível de velocidade de alimentação de arame, conforme planejamento experimental adotado, isto é, favorece os menores %Fe e %D, maiores valores de Resistência a polarização, maior potencial de corrosão e menor corrente de corrosão. Resultando assim em uma maior resistência a corrosão.

Palavras-chave: Aço API 5L X70, GMAW, corrosão.

ABSTRACT

Metallic materials are widely used in industry, including API 5L X70 steel, used for oil transportation. However, these steels are susceptible to corrosion due to the aggressive environment. As a result, various studies have been carried out to mitigate the effect of corrosion. Solid wire welding processes are used to weld coatings for this purpose, but they require information from the user to determine the most suitable welding conditions. The aim of this work was to study the influence of welding parameters for Inconel 625-based coatings on electrochemical corrosion measurements. To optimize the experiments, a full factorial design was used to evaluate the welding parameters, welding speed and feed rate. After welding, the samples were cross-sectioned and dilution calculations and iron content measurements were made by EDX.

¹ Bacharelado em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2024.

² Doutor em Ciências e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2018.

Finally, to reveal the corrosion resistance, the electrochemical technique by linear potentiodynamic polarization was used, through polarization resistance, corrosion potential, corrosion current.

Keywords: API 5L X70 steel, GMAW, corrosion.

INTRODUÇÃO

Os combustíveis fósseis, liderados pelo petróleo, representam a maior parte da matriz energética global (Petrobras, 2024). Por isso, as indústrias energéticas têm explorado cada vez mais o petróleo em ambientes severos, frequentemente utilizando dutos de aço carbono de alta resistência e baixa liga (ARBL) para o transporte e distribuição desses recursos (Mohtadi-Bonab *et al.*, 2015).

Dentro dessa categoria de aços ARBL, os graus API se destacam por apresentarem uma relação elevada entre resistência mecânica e tenacidade tornando-os adequados para ambientes agressivos (Giarola *et al.*, 2022). Este material está em conformidade com a especificação API 5L (Specification for Line Pipe Steel). São comumente utilizados em ambientes severos, que por sua vez são susceptíveis à corrosão.

O fenômeno da corrosão metálica é definido como a deterioração por ação química ou eletroquímica do meio operacional, sendo associada, ou não, a esforços mecânicos, prejudicando a funcionalidade do material (Gentil, 2011). Os dutos de aços ARBL são susceptíveis à corrosão quando expostos ao meio marinho e a acidez do petróleo. Assim, estudos são realizados para mitigar os fenômenos da corrosão na área de exploração de petróleo, sendo um desafio para evitar desastres ambientais e prejuízos econômicos (Tantawy; Soliman; Abd El-Lateef, 2020). Dentre os estudos realizados, destacam-se as técnicas de aplicação de revestimentos com materiais nobres, afim de reduzir o efeito da corrosão (Xie *et al.*, 2020; Bezerra *et al.*, 2023).

Dentre as técnicas utilizadas para revestir superfície metálicas, destaca-se a deposição por soldagem. Esse método proporciona a aplicação de revestimentos protetores espessos que se ligam metalurgicamente ao material do substrato. O processo de soldagem GMAW (Gas metal arc welding) destaca-se frente a outros processos por ser versátil, elevada produtividade e baixo custo, tanto para soldagem de união, quanto para soldagem de revestimentos. (Rajkumar *et al.*, 2019; Verdete; Rontescu; Alexandru, 2022).

O processo GMAW apresenta controle sobre os parâmetros de soldagem (velocidade de alimentação, velocidade de soldagem e vazão do gás de proteção) para garantir a qualidade e a integridade do revestimento. Para obter uma qualidade satisfatória nas soldas deve conhecer bem as variáveis que controlam sozinhas ou em conjunto as características finais dos cordões de solda. As velocidades de soldagem e de alimentação são parâmetros importantes tanto para soldagem de união quanto para revestimento.

A velocidade de alimentação do arame é diretamente proporcional a corrente de soldagem, para baixa intensidade de corrente, esse comportamento é praticamente linear, a medida que a velocidade do arame é variada a corrente varia de forma semelhante quando se utiliza uma fonte de soldagem com tensão constante e seus picos de corrente são dependentes do seu diâmetro e sua composição (Modenesi, 1998). Por outro lado, a velocidade de soldagem, nada mais é que a velocidade com que o arco e a fonte de calor se deslocam sobre a peça (Scotti, A.; Ponomarev, 2008).

Aumentos de velocidade de soldagem tem impacto negativo nos principais parâmetros geométricos do cordão, visto que a redução de aporte térmico reduz a quantidade de metal fundido e depositado (Silva *et al.* 2018, Viano *et al.* 2000). A profundidade de penetração, em especial, tem comportamento limitante em relação à velocidade de soldagem, uma vez que com a deslocamento mais rápido do arco a camada de metal fundido se estreita, resultando em menor condução de corrente e de calor na junta (Ghosh *et al.* 2007).

Além disso, para obter soldas com alta qualidade, é crucial controlar rigorosamente a diluição, buscando minimizá-la durante o processo de soldagem. Dessa forma, reduz-se a influência do metal base, evitando a formação de microestruturas frágeis e susceptíveis à corrosão (Batista *et al.*, 2011; Baumgaertner Filho; Gonzalez, 2017).

Os metais de adição, material adicionado durante o processo de soldagem, mais empregadas como revestimento através do processo GMAW, são os que apresentam grande potencial devido à resistência ao desgaste e corrosão, com ampla faixa de temperatura, desde a ambiente até 823 K. Por consequência, essas ligas são amplamente adotadas em ambientes extremos e condições operacionais desafiadoras (Suthar *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2021). As ligas mais utilizadas para este fim, são as superligas de níquel, podendo destacar a inconel 625, por ser uma superliga de níquel fortalecida por solução sólida, amplamente empregada em processos de revestimento nos setores industriais, incluindo petroquímica, naval, nuclear e aeroespacial. (N. Pravin Kumar, N. Siva Shanmugam, 2020).

Este trabalho se propõe a analisar os efeitos dos parâmetros de soldagem na resistência à corrosão de revestimentos à base de Níquel inconel 625 depositados pelo processo de soldagem GMAW em aços API 5L X70. Para determinar os melhores valores dos parâmetros de soldagem foi utilizada a ferramenta de planejamento fatorial experimental.

METODOLOGIA

Neste trabalho foram utilizadas chapas de aço API 5L X70 revestida com inconel 625, ER NiCrMo-3, através do processo de soldagem GMAW em diferentes condições de soldagem.

As condições para deposição do revestimento seguiram o planejamento fatorial em dois níveis (2^{K+2}), com duas repetições do ponto central que resulta em 6 experimentos, onde K é o número de variáveis de entrada. Foram variados os valores de velocidade de alimentação do arame (Va) e velocidade de soldagem (Vs). Os valores desses níveis se encontram na Tabela. 1.

Tabela 1 – Valores reais e níveis dos fatores de planejamento fatorial completo 2^3 .

Variáveis	Níveis		
	-1	0	1
Velocidade de Alimentação (m/min)	6	7,5	9
Velocidade de Soldagem (cm/min)	20	25	30

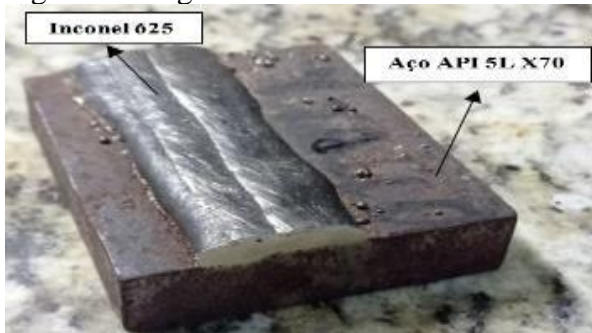
Fonte: O autor, 2024

As variáveis foram avaliadas nos níveis codificados baixo (-1), central (0) e alto (+1). Os experimentos foram realizados em duplicata e em ordem aleatória para evitar erros sistemáticos. Para análise estatística dos resultados foi utilizado o software STATISTICA® versão 7.0.

Outros parâmetros associados ao processo, foram fixados, tais como: tensão de soldagem, vazão do gás de proteção e DBCP.

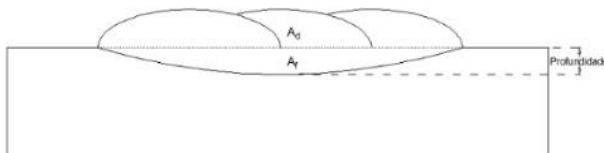
As chapas revestidas, nas condições estabelecidas pelo planejamento experimental, foram seccionadas transversalmente para análise da diluição (D), conforme esquema apresentado na Figura 1,

Figura 1. Imagem do cordão de solda



Fonte: Santos, 2014

Figura 2. Perfil da chapa revestida



Fonte: Pessoa, 2010

A diluição é o percentual do metal de base que é dissolvido junto ao metal de adição, formando a composição química do metal de solda, sendo medida em função da área do metal de base fundida (A_f) e do metal depositado (A_d), como pode ser visto na equação 1.

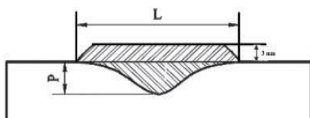
$$D(\%) = \frac{A_f}{A_f + A_d} * 100$$

A análise da composição química (teor de ferro) foi feita por energia dispersiva de raios-x (EDX), utilizando equipamento Analytical QX-2000

Análise de corrosão

As superfícies das amostras foram usinadas por aplainamento, ficando com uma altura do reforço igual a 3 mm, conforme ilustrado na Figura 3, conforme norma 1707 da Petrobras para revestimentos.

Figura 3 - Perfil do revestimento usinado

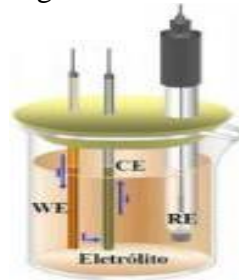


Fonte: Pessoa, 2010

Para obter as medidas eletroquímica de corrosão, potencial de corrosão (E_{corr}), corrente de corrosão (I_{corr}) e resistência à polarização (R_p), foi utilizada a técnica eletroquímica polarização potenciodinâmica linear (PPL). Os ensaios foram realizados em um potenciostato VersaStation 3, utilizando uma célula convencional de três eletrodos. Os corpos de prova foram utilizados como o eletrodo de trabalho (WE), o eletrodo de calomelano saturado (Hg/Hg₂Cl₂, KCl sat.) como eletrodo de referência (RE), e fio de platina como contra-eletrodo (CE), conforme esquema ilustrado na Figura 4.

Cada experimento utilizou 60 ml de uma solução eletrolítica de NaCl a 3,5%.

Figura 4 - Célula eletroquímica padrão



Fonte: Pinto, 2004

O potencial de circuito aberto (OCP) foi monitorado por 3600 segundos, para garantir a estabilização do potencial. Após a estabilização do OCP, foi iniciado o ensaio de polarização potenciodinâmica, no qual realizou-se a varredura de potencial na faixa de -1 V a 1 V, a uma taxa de 1 mV/s.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição Química e Diluição

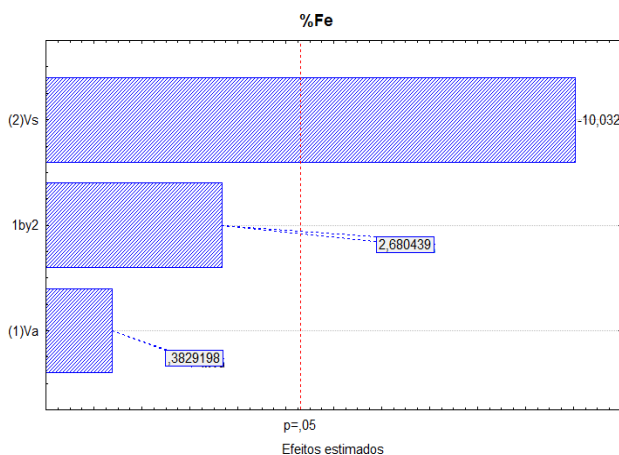
A Tabela 2 apresenta a matriz do planejamento experimental com os resultados do percentual de composição química de Fe, em percentual em massa (wt%), o qual variou 6,95% a 7,78% para cada elemento e a o percentual de diluição $D(\%)$, o qual variou de 6,77% a 9,46%.

Tabela 2 - Percentuais de Ferro Fe(%) e Diluição D(%).

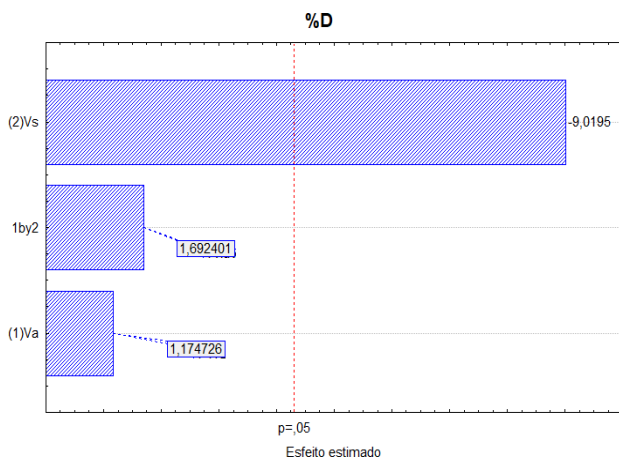
Exp.	Níveis (reais)		Resultados	
	Va (m/min)	Vs (cm/min)	Fe (%)	D (%)
1	6	20	7,78	9,46
2	9	20	7,63	9,33
3	6	30	6,95	6,77
4	9	30	7,15	7,49
5	7,5	25	7,41	7,96
6	7,5	25	7,48	7,95

Fonte: O autor, 2024

Figura 5 - Diagrama de Pareto 5: (a) %Fe e (b) % D



(a)



(b)

Fonte: O autor, 2024

Analisando os resultados apresentados na Figura 5, verificou-se que a, velocidade de soldagem, Vs, mostrou influência estatística significativa, enquanto que a velocidade de alimentação e a interação das variáveis (VsxVa) não apresentaram influência estatística significativa, tanto para o percentual de ferro %Fe, quanto para o percentual de diluição (%D). O valor negativo na barra da velocidade de soldagem do diagrama de Pareto, representa que à medida que a velocidade de soldagem diminui a diluição aumenta. Embora, a velocidade de alimentação do arame não tenha apresentado efeito significativo, o sinal positivo na barra indica que o aumento da velocidade de alimentação do arame aumenta o teor de ferro e a diluição também aumentam.

Conforme resultados apresentados na Tabela 2, o experimento 3 indica que essa condição com maior valor de Vs e menor valor de Va favorecem os menores valores de percentual de ferro e de diluição. Esses menores valores de %Fe e %D, tendem a favorecer maior resistência a corrosão. Resultado similar foi observado por Nasu et al. (2004) e Donten et al. (2000). Para confirmar a tendência dos resultados de %Fe e %D com relação a resistência a corrosão, medidas eletroquímicas de corrosão foram realizadas por polarização potenciodinâmica linear (PPL).

3.1 Medidas eletroquímicas de corrosão

A Tabela 3 apresenta os resultados das análises de corrosão através das medidas eletroquímicas de resistência a polarização (Rp), a qual relaciona o potencial padrão de redução metálico com a corrente de corrosão na obtenção dos dados necessários que definiram o comportamento de passivação na interface eletrólito/metal, potencial de corrosão (Ecorr), no qual representa parâmetro termodinâmico e a corrente de corrosão (Icorr) a qual está relacionada com a interação do fluxo de íons na interface eletrólito/metal, quanto menor essa

interação menor será a velocidade do processo corrosivo

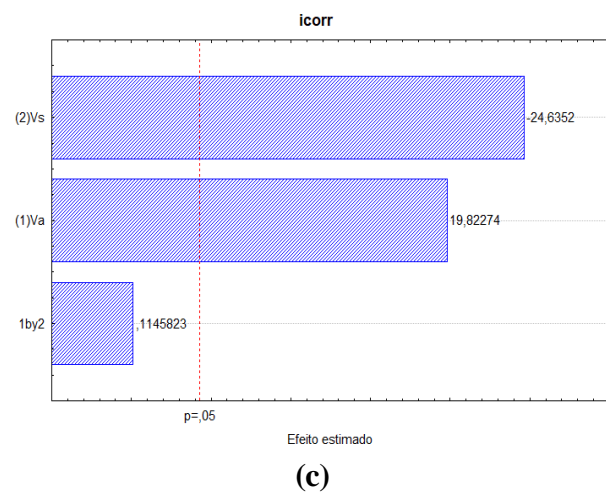
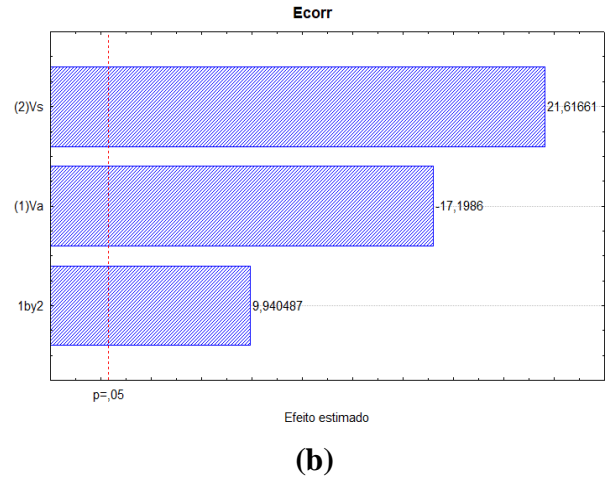
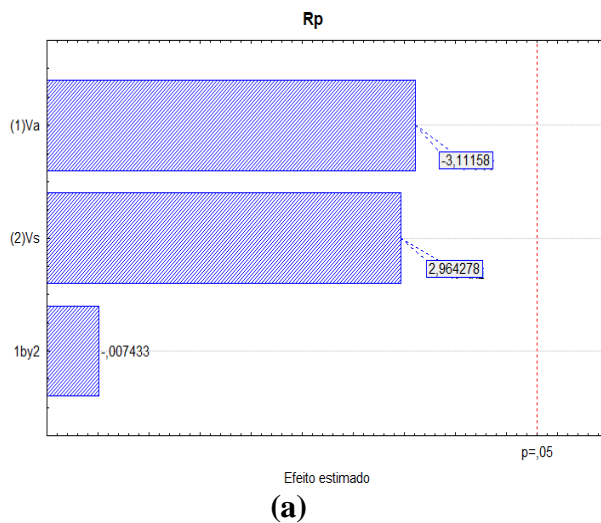
Tabela 3 . Resultado de Rp, Ecorr e Icorr

Exp	Níveis (Reais)		Resultados		
	Va (m/min)	Vs (cm/min)	Rp (KΩ)	E _{corr} (V)	I _{corr} (A)
1	6	20	343,22	-0,639	10,16
2	9	20	320,25	-0,725	11,02
3	6	30	365,21	-0,602	9,08
4	9	30	342,13	-0,625	9,95
5	7,5	25	335,91	-0,652	10,08
6	7,5	25	332,01	-0,646	10,12

Fonte: O autor, 2024

Diante dos resultados experimentais obtidos, foi adotado um nível de confiabilidade dos resultados de 95%. Os Diagramas de Pareto apresentados nas Figuras 6(a) 6(b) e 6(c), indicam qual(ais) das variáveis de estudo apresentaram significância estatística nos parâmetros (Rp, Ecorr e Icorr) eletroquímicos de corrosão dos revestimentos a base da liga inonel 625 depositados por GMAW em aços ARBL X70.

Figura 6. Os Diagramas de Pareto (a) Rp, (b) Ecorr e (c) Icorr.



Fonte: O autor, 2024

Através da Figura 6a observa-se que tanto a velocidade de soldagem (Vs) e a velocidade de alimentação do arame(Va) não apresentaram influência estatisticamente significativa nos resultados da resistência a polarização. Por outro lado, na Figura 6b a velocidade de soldagem e velocidade de alimentação mostraram efeito estatisticamente significativo. O sinal positivo na barra referente a Vs indica que, com a elevação da velocidade de soldagem, o potencial de corrosão, Ecorr, aumenta para valores mais próximo do potencial igual a zero. Já para a barra referente a Va, o sinal negativo indica que, com a redução do valor da velocidade de alimentação do arame, o potencial tende a crescer e se aproxima de valores próximo a zero.

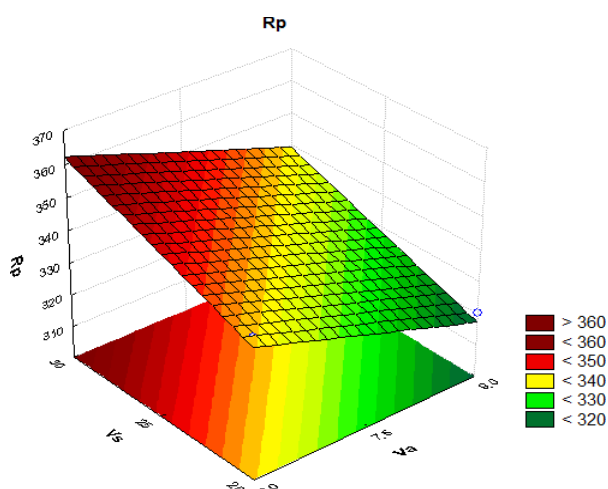
Enfim, para a Figura 6c, a velocidade de soldagem e velocidade de alimentação mostraram efeito estatisticamente significativo.

O sinal negativo na barra referente a V_s indica que, com a diminuição da velocidade de soldagem, a corrente de corrosão, i_{corr} , diminui. Por outro lado, para a barra referente a V_a , o sinal positivo indica que, com a elevação do valor da velocidade de alimentação do arame, a corrente de corrosão tende a diminuir.

As Figuras 7, 8 e 9, apresentam o comportamento da velocidade de soldagem vs. a velocidade de alimentação do arame frente aos parâmetros eletroquímicos de corrosão (R_p , E_{corr} e i_{corr}), através da superfície de resposta.

Na Figura 7 observa-se que, com a elevação da velocidade de soldagem e diminuição da velocidade de alimentação do arame, ocorre o aumento das propriedades anticorrosivas (resistência à polarização), atingindo um valor máximo aproximadamente de 363 K Ω . Este valor está próximo do valor experimental obtido no experimento 3 nas condições que é de 365,21K Ω .

Figura 7. Superfície de resposta da resistência a polarização sob influência da velocidade de soldagem vs. Velocidade de alimentação do arame

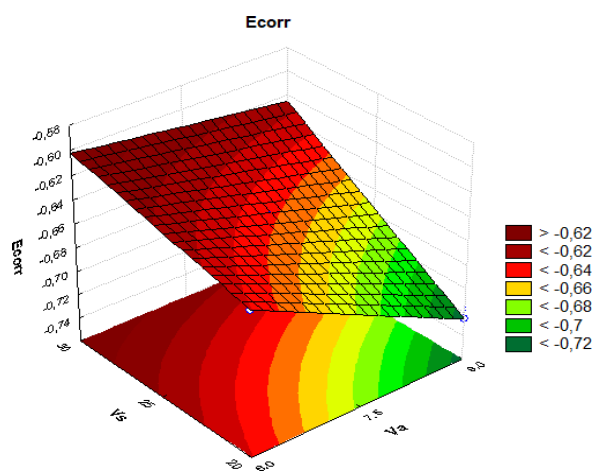


Fonte: O autor, 2024

Assim, o experimento 3 com menor teor de ferro e menor percentual de diluição, apresentou maior resistência a polarização, indicando maiores e melhores propriedades anticorrosivas no revestimento depositado nesta condição, isto é, aumento da resistência à polarização está associado à formação do filme de passivação. Estudos mostram que o aumento da velocidade de soldagem diminui o aporte térmico, resultando em uma fusão menos eficaz entre o material de adição e a material base. Da mesma forma, a velocidade de alimentação influencia na quantidade de material depositado, onde altas velocidades de alimentação também reduzem o aporte térmico e a união metalúrgica entre os materiais. (Lin, 2013; Kweman, 2012).

A Figura 8 apresenta o efeito dos valores da velocidade de soldagem e da velocidade de alimentação do arame do potencial de corrosão (E_{corr}) dos revestimentos.

Figura 8. Superfície de resposta do potencial de corrosão sob influência da velocidade de soldagem vs. Velocidade de alimentação do arame



Fonte: O autor, 2024

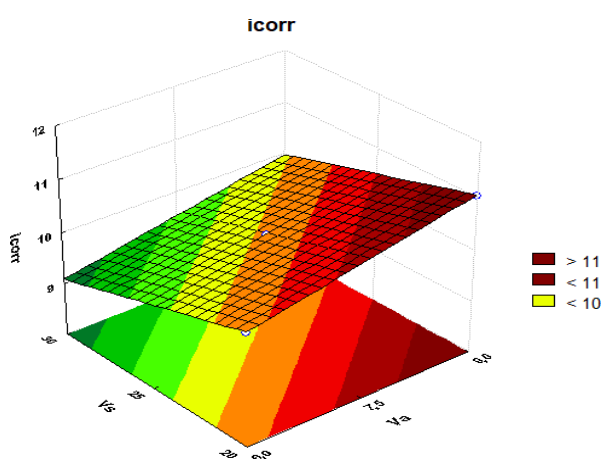
Assim, observou-se que a diminuição da velocidade de soldagem e elevação da velocidade de alimentação do arame, ocorre o aumento no valor do E_{corr} atingindo um valor máximo

aproximadamente de -0,601V.

Este valor está próximo do valor experimental obtido no experimento 3 nas mesmas condições que é de -0,602 V.

A Figura 9 mostra o comportamento do efeito da velocidade de soldagem e da velocidade de alimentação do arame na corrente de corrosão (i_{corr}). À medida que se aumenta a velocidade de soldagem e diminui a velocidade de alimentação do arame, os valores da i_{corr} diminui, atingindo o valor igual a 9,08 A.

Figura 9. Superfície de resposta da corrente de corrosão sob influência da velocidade de soldagem vs. Velocidade de alimentação do arame



Fonte: O autor, 2024

Esse comportamento está associado com a redução do teor de ferro na superfície do revestimento, devido ao menor valor da diluição, ou seja, menor participação do metal de base no revestimento. A baixa corrente de corrosão, indica que temos uma maior restrição à condução de corrente elétrica (Keddam *et al.*, 1983). Isto é, favorecendo a menor dissolução do revestimento devido a possível formação do filme de passivação. O mesmo processo foi observado por (Bojinov *et al.*, 2000).

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

- A utilização do planejamento fatorial foi satisfatória para a obtenção dos melhores parâmetros em termos de V_s e V_a ;
- maior valor de V_s e menor valor de V_a favorece os menores valores de percentual de ferro e de diluição;
- menores valores de %Fe e %D, tendem a favorecer maior resistência a corrosão;
- maiores velocidades de soldagem e menores velocidade de alimentação do arame, tendem a maiores valores de Resistência a polarização (R_p), maiores valores de potencial de corrosão (E_{corr}) e menores valores de corrente de corrosão (i_{corr}), conforme experimento 3, favorecendo a melhor resistência a corrosão.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). **Specification For Linepipe: ANSI/API specification 5L**. 44 ed. Chicago, 2007. Disponível em: <https://www.worldironsteel.com/Content/upload/PDF/20179562/API-5L.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2024.

BATISTA, V. R. *et al.* Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a geometria e diluição de revestimentos de liga de níquel aplicados em aço API 5L Gr B. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos (UFMG)**, v. 6, n. 3, p. 181-187, 2011. Disponível em: <https://remap.revistas.ufcg.edu.br/index.php/remap/article/view/258/225>. Acesso em: 19 ago. 2024.

BAUMGAERTNER FILHO, A. J.; GONZALEZ, A. R. Estudo dos Parâmetros de Polaridade Negativa na Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável para Revestimento. **Soldagem & Inspeção**, v. 22, n. 1, p. 46–58, mar. 2017. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/si/a/bkXSx5MThhc4fnXQRN5x8Jz/?format=html&lang=pt>.

Acesso em: 19 ago. 2024.

BEZERRA, I. et al. Microstructure characterization of the weld cladding of clad steel plate A516 GR.70 - AISI 904L by electroslag strip cladding using Inconel 625 strip. **Welding in the world**, v. 67, n. 11, p. 2571–2587, 10 ago. 2023. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-023-01575-7>. Acesso em: 24 abr. 2024.

BOJINOV, M.; BETOVA, I.; RAICHEFF, R. Influence of pH on the anodic dissolution mechanism of Fe–Mo alloys in sulphate solutions. **Electrochimica Acta**, v. 44, n. 5, p. 721–734, out. 1998. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468698002321>. Acesso em: 20 abr. 2024.

CUNICO, M. W. M. *et al.* Planejamento fatorial: Uma ferramenta estatística valiosa para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica. **Visão Acadêmica**, v. 9, n. 1, 30 jun. 2008. Disponível em:

<https://revistas.ufpr.br/academica/article/view/14635>. Acesso em: 19 ago. 2024.

DONTEN, M.; CESIULIS, H.; STOJEK, Z. Electrodeposition and properties of NiW, FeW and FeNiW amorphous alloys. A comparative study. **Electrochimica Acta**, v. 45, n. 20, p. 3389–3396, jun. 2000. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468600004370>. Acesso em:

24 abr. 2024.

FERNANDES, P.E.A. Avaliação da tenacidade à fratura da zona afetada pelo calor (ZAC) do aço API 5L X80 soldado pelos processos SMAW e FCAW. 109p.

Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em:

<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-30032012-121048/>. Acesso em:

15 abr. 2024.

GENTIL, Vicente. **Corrôso**. 6. ed. rev. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GHOSH A, CHATTOPADHYAYA S, SARKAR PK. Effect of input parameters on weld bead geometry of SAW process. In:

PROCEEDING OF INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICAL ENGINEERING – ICME, 07., dec. 2007, Dhaka, Bangladesh. **Anais** [...] Dhaka, Bangladesh. Hong Kong, China: ICME, 2007. Disponível em:

http://www.iaset.us/index.php/download/archives/2-67-1516595609-4.%20IJME%20-%20STUDY%20OF%20THE%20EFFEC%20T%20OF%20PROCESS%20PARAMETERS%20ON%20_2_.pdf. Acesso em: 11 ago. 2024.

GIAROLA, J. M. et al. The effect of hydrogen on the fracture toughness of friction-stir welded API 5L X70 pipeline steels. **Fatigue & fracture of engineering materials & structures**, v. 45, n. 10, p. 3009–3024, 10 ago. 2022. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/ffe.13799>. Acesso em: 15 abr. 2024.

KEDDAM, M.; MATTOS, O. R.; TAKENOUTI, H. Mechanism of anodic dissolution of iron-chromium alloys investigated by electrode impedances—I. Experimental results and reaction model. **Electrochimica Acta**, v. 31, n. 9, p. 1147–1158, set. 1986. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/001346868680127X>. Acesso em:

22 abr. 2024.

LIN, C.-M. Relationships between microstructures and properties of buffer layer with Inconel 52M clad on AISI 316L stainless steel by GTAW processing. **Surface and Coatings Technology**, v. 228, p. 234–241, ago. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897213003794>. Acesso em: 19 ago. 2024.

MOHTADI-BONAB, M. A. et al. The mechanism of failure by hydrogen induced cracking in an acidic environment for API 5L X70 pipeline steel. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 2, p. 1096–1107, jan. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031991403136X>. Acesso em: 15 abr. 2024.

N. PRAVIN KUMAR; N. SIVA SHANMUGAM. Some studies on nickel-based Inconel 625 hard overlays on AISI 316L plate by gas metal arc welding based hardfacing process. **Wear**, v. 456-457, p. 203394–203394, 1 set. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164820302003>. Acesso em: 19 ago. 2024

MARQUES, PAULO VILLANI; MODENESI, PAULO JOSÉ; BRACARENSE, ALEXANDRE QUEIROZ. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: Ed. Da Ufmg, 2005. Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/laboratorios/laboratorio-de-soldagem/soldagem-fundamentos-e-tecnologia/>. Acesso em: 11 mai. 2024.

PETROBRAS. **Plano Estratégico 2024-2028**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2023. Disponível em: <https://petrobras.com.br/quem-somos/estrategia>. Acesso: 08 de abr. 2024.

RAJKUMAR, V. et al. Effect of Heat Input on Micro-Hardness and Shear Strength of Inconel 625 Hardfacing onto AISI 347 Steel pipes by GMAW Process. **Journal of physics**. Conference series, v. 1355, n. 1, p. 012029–012029, 1 nov. 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1355/1/012029>. Acesso em: 25 abr. 2024.

SANTOS, A. X. DOS; MACIEL, T. M.; SANTANA, R. A. C. DE. Avaliação de Revestimentos à base de Inconel 625 depositados através do Processo de Soldagem GMAW em aço API 5L X70 utilizando Planejamento Fatorial. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, v. 34, n. 3, p. 128, 30 ago. 2015. Disponível em: <http://www.sbvacu.org.br/rbav/index.php/rbav/article/view/995>. Acesso em: 22 abr. 2024.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. SOLDAGEM MIG/MAG. In: SCOTTI, Américo. **SOLDAGEM MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho**. 2. ed. rev. São Paulo: Artliber Editora, 2008. p. 1-70.

SILVA, A. C. S. DA et al. Soldagem Helicoidal de Tubos Produzida em Campo do Aço ASTM A-1018 e sua Correlação com Características Mecânicas e Microestruturais das Juntas Soldadas. **Soldagem & Inspeção**, v. 23, p. 364–379, 2018. Disponível em: scielo.br/j/si/a/dTKD4Twv7LNHmwZRRcmYXCb/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 17 ago. 2024

- SINGH RP, GARG RK, SHUKLA DK. Parametric effect on mechanical properties in submerged arc welding process - A review. **International Journal of Engineering Science and Technology**. 2012; 4:747-757. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Ravinder-Singh-82/publication/265009620_Parametric_Effect_on_Mechanical_Properties_in_Submerged_arc_welding_process_-_A_review/links/5747344308aef66a78b078b6/Parametric-Effect-on-Mechanical-Properties-in-Submerged-arc-welding-process-A-review.pdf. Acesso em 25 mai. 2024.
- SUTHAR, F. V. et al. Optimization of GTAW process parameters for deposition of nickel-based hardfacing alloy using Taguchi method. **Welding in the world**, v. 67, n. 8, p. 1951–1966, 30 maio 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/372517661_Optimization_of_GTAW_process_parameters_for_deposition_of_nickel-based_hardfacing_alloy_using_Taguchi_method. Acesso em: 19 ago. 2024.
- TANTAWY, A. H.; SOLIMAN, K. A.; ABD EL-LATEEF, H. M. Novel synthesized cationic surfactants based on natural piper nigrum as sustainable-green inhibitors for steel pipeline corrosion in CO₂-3.5%NaCl: DFT, Monte Carlo simulations and experimental approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 250, p. 119510, mar. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261934380X>. Acesso em: 21 abr. 2024.
- VERDETE, B. M.; RONTESCU, C. ALEXANDRU, T. G. Capturing the temperature gradients of GMAW hardfacing processes by employing CFD and FEM simulation procedures. **MATEC Web of Conferences**, v. 373, p. 00065, 2022. Disponível em: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2022/20/mateconf_simpro2022_00065.pdf. Acesso em: 25 abr. 2024.
- VIANO, D. M.; AHMED, N. U.; SCHUMANN, G. O. Influence of heat input and travel speed on microstructure and mechanical properties of double tandem submerged arc high strength low alloy steel weldments. **Journal of Science and Technology of Welding and Joining**, v. 5, n. 1, p. 26–34, 1 fev. 2000. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1179/stw.2000.5.1.26?needAccess=true>. Acesso em: 14 mai. 2024.
- WEMAN, Klas. **Welding Process Handbook**. 2. ed. rev. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2012. ISBN 9780857095183. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780857095107/welding-processes-handbook>. Acesso em: 19 ago. 2024.
- XIE, F. et al. A synergistic effect of dissolved oxygen, HCO₃⁻, and Cl⁻ on the electrochemical corrosion behavior of X70 pipeline steel in the oilfield soil environment. **Applied physics. A Materials science & processing**, v. 126, n. 11, 16 out. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00339-020-03792-z>. Acesso em: 23 abr. 2024.
- ZHU, Z. *et al.* The corrosion behavior of nickel-based alloy Inconel 740 H in supercritical water. **Corrosion science**, v. 192, p. 109848–109848, 1 nov. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X21006144>. Acesso em: 19 ago. 2024.
- ZIKIN, Arkadi *et al.* Characterisation of TiC-NiMo reinforced Ni-based hardfacing. **Surface and Coatings Technology**, [s. l.], ano 2013, p. 36-44, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897213001825>. Acesso em: 25 abr. 2024.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao campus das Engenharias da Unidade Acadêmica Cabo de Santo Agostinho (UACSA) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Ao Prof. T.A. Simões pelo aporte financeiro (Projeto Inova Nióbio 2022 (Processo 408905/2022))