

INFLUÊNCIA DA TENSÃO, VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO E DBCP NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE REVESTIMENTOS À BASE DA LIGA INCONEL 625 DEPOSITADA POR MIG.

¹IGOR JALOTO DE LIMA

²Aureliano Xavier dos Santos

RESUMO

São investidos, anualmente, altas quantias em manutenção de dutos utilizados na indústria do petróleo ao redor do globo terrestre. Assim, buscam-se soluções que aliem baixo custo, reprodutibilidade e propriedades que sejam consistentes, principalmente contra a corrosão. Uma dessas, é o uso de materiais que possuem elevadas propriedades mecânicas e anticorrosivas na forma de revestimentos, podendo ser depositados por soldagem. Objetivou-se neste estudo, avaliar os efeitos de diferentes parâmetros de soldagem sobre a resistência à corrosão de revestimentos à base da liga Inconel 625, depositados pelo processo MIG em aço API 5L X70. Os parâmetros foram otimizados utilizando o planejamento experimental fatorial e os resultados analisados pela Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). Foram realizados três depósitos com sobreposição de ½ por processo de soldagem MIG (*Metal Inert Gas*), seguindo de corte transversal das amostras para análise da diluição (D), teor de ferro (Fe) e resistência à corrosão por polarização potenciodinâmica linear (PPL), através do potencial de corrosão (E_{corr}), corrente de corrosão (I_{corr}) e resistência à polarização (R_p). Os revestimentos obtidos apresentaram valores da diluição que variaram de 5,8% a 15,01%, sendo o revestimento com menor valor de diluição, aquele que apresentou menores I_{corr} e Fe, além de maiores E_{corr} e R_p , assim, maior resistência à corrosão.

Palavras-chave: Aços ARBL. MIG. Inconel 625. Corrosão - metal.

ABSTRACT

Annually, high investments are made in the maintenance of pipelines used in the oil industry around the globe. Thus, solutions are sought that combine low cost, reproducibility and properties that are consistent, mainly against corrosion. One of these is the use of materials that have high mechanical and anticorrosive properties in the form of coatings, which could be deposited by welding. The objective of this study was to evaluate the effects of different welding parameters on the corrosion resistance of coatings based on the Inconel 625 alloy, deposited by MIG process in API 5L X70 steel. The parameters were optimized using the factorial experimental design and the results analyzed by the Response Surface Methodology (RSM). Three deposits with ½ overlap were performed by MIG welding process, followed by a cross section cut in the samples for analysis of the dilution, iron content and corrosion resistance by linear potentiodynamic polarization (PPL) through corrosion potential (E_{corr}), corrosion current (I_{corr}) and polarization resistance (R_p). The coatings obtained presented values of the dilution ranging from 5.8% to 15.01%. The coating that presented lower dilution value, also was the one with lower I_{corr} and Fe, besides higher R_p and E_{corr} , thus, greater corrosion resistance.

Keywords: ARBL Steel, Coating. Inconel 625. Corrosion - metal.

¹Bachalorando em Engenharia de Materiais - Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho – Cabo de Santo Agostinho (PE) – Brasil

²Orientador do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Materiais – Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (PE) – Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A produção de petróleo necessita de um planejamento ótimo, uma vez que o trajeto dos oleodutos subaquáticos é passível de falhas, por conta de diversos fatores e podem resultar em longos períodos de inatividade, custos elevados de manutenção do sistema, inspeção e custosos serviços de suporte das empresas, fornecedoras de garantia (MARKESET et al, 2013).

O transporte é comumente realizado através de dutos de aço, classificados segundo a API (*American Petroleum Institute*), de acordo com suas aplicações e resistências mecânicas. Suas composições variam do API 5L A25 até o API 5L X80, sendo os últimos dígitos resultantes do limite de escoamento pertencente a cada aço (em ksi), como por exemplo o API 5L X70, apresenta tensão de limite de escoamento de 70 ksi ou 481 MPa, aproximadamente. São utilizados em tubulações de alta pressão, que por sua vez são susceptíveis à corrosão (FERNANDES, 2011; API, 2007).

Esses aços citados, apesar de possuírem elevada resistência mecânica e apresentarem certa resistência à corrosão, ainda estão sujeitos a esse último fenômeno, devido às condições agressivas do meio em que se encontram esses dutos, sendo caracterizadas pela presença de óxidos, sulfatos e a salinidade da água, por exemplo (NORSWORTHY, 2014). De acordo com a literatura, pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio operacional, sendo associada, ou não, a esforços mecânicos, prejudicando de modo parcial ou total a utilização desse material. (GENTIL, 2007)

Considerando que a maior intensidade de corrosão em ambientes subaquáticos é proveniente da corrosão por pites (SCHVARTZMAN et al, 2004), essa gera custos de manutenção dos dutos que transportam petróleo na casa de bilhões ao ano. Segundo a Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO), essas perdas chegam a estar ao patamar de 3,5% do PIB brasileiro, além de prejudicar a vida marinha ao redor do globo, por isso são estudadas a obtenção de ligas e novos materiais, que sejam resistentes aos danos que podem ser causados por essas reações (RAJENDRAN e SUSAI, 2014; THELLAPUTTA et al, 2017).

Uma das soluções estudadas é a deposição de ligas/superligas de níquel, como a Inconel em aços que, por natureza, estão sujeitos a esses ambientes agressivos. Essas ligas caracterizam-se, especialmente, por associarem boa resistência à fluência e à fadiga, além de alta resistência mecânica (AKCA e GURSEL, 2015), à corrosão em altas temperaturas, (FRENKEL, 1998) e, ainda, à fratura assistida pelo meio ambiente (FORD, 1989; AKCA e GURSEL, 2015). Em especial, pode-se destacar a liga Inconel 625, que é utilizada por conta de sua resistência

mecânica e à corrosão (Nb, Cr, Ni, Mo), além da facilidade de fabricação. Sua temperatura de serviço varia desde a -157°C até 982°C , não sendo necessários tratamentos térmicos para aumento de resistência (DATA SHEET, 2013).

Para deposição desse tipo de liga, o processo de soldagem MIG para revestimentos pode ser utilizado, que apresenta características que o torna uma boa opção, tendo em vista os demais processos de soldagem para revestimentos, sendo estas: não há formação de escórias (o que levaria a sua inevitável remoção); versátil em relação ao tipo e espessura do material; penetração no metal de base é uniforme; a diluição pode ser controlada; distorções e tensões residuais são menores, em relação a outros processos de soldagem (BALMER, 2008).

Nesse processo de soldagem, espera-se que o nível de diluição seja reduzido, tanto para diminuir o teor de ferro (DNV, 2017) na superfície de cordão, quanto para evitar que microestruturas susceptíveis à corrosão possam ser formadas (WAINER et al, 1992). Para que se chegue a resultados como esses, os parâmetros de soldagem devem ser ajustados de acordo com o planejamento experimental. Como pode ser observado na Figura 1 ao alterar, por exemplo, a DBCP (Distância do Bico de Contato à Peça), há uma tendência em diminuir o nível de distorção e de penetração da solda (PARANHOS e SOUZA, 1999).

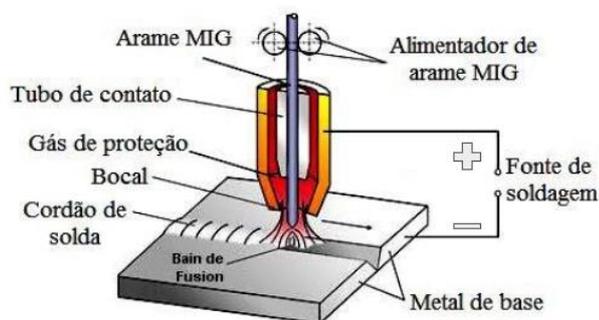


Figura 1 – Esquema de soldagem por união MIG.

Fonte: Adaptado de COSTA et al, 2013

Como complemento, podem ser feitas análises para avaliação da resistência à corrosão dos revestimentos, sendo conduzidas através de: resistência à polarização (ASTM G-59, 1997; (WOLYNEC, 2003), potencial de corrosão (IGNATIADIS e AMALHAY, 2001). e a corrente de corrosão (PONTE, 2003).

A análise estatística vem substituindo o empirismo nos trabalhos científicos, já que pode auxiliar na obtenção de resultados satisfatórios por meio de precisão na resposta e menor custo (BOX et al, 2005; MONTGOMERY, 2009). O planejamento fatorial tende a reduzir o número de experimentos. Com a análise simultânea de fatores, pode-se obter mais de uma resposta ao

mesmo tempo, além do cálculo do erro experimental (RODRIGUES e LEMMA, 2009). A técnica já é utilizada por diversos autores para a otimização de parâmetros de soldagem (BATISTA et al, 2010; NOURI et al, 2007).

O planejamento fatorial pode ser representado por b^k , sendo que “k” representa o número de fatores e “b”, o número de níveis escolhidos. O caso mais simplista é aquele em que cada fator “k” está presente em apenas dois níveis “b” (fatorial 2^k). (NEVES, 2002)

O objetivo desse trabalho é avaliar o efeito de diferentes parâmetros de soldagem sobre a resistência à corrosão de revestimentos à base da liga Inconel 625 aplicados pelo processo de soldagem MIG em aços API 5L X70.

Assim, pode-se depositar um revestimento, através da soldagem, buscando parâmetros ótimos que melhorem as propriedades no metal de solda. Para que seja depositada de forma proveitosa, podem ser consideradas diversas possibilidades e a escolha do processo correto é crucial para que seja obtido um resultado ótimo.

1. METODOLOGIA

Foi utilizada a chapa de aço ARBL API 5L X70 com 19 mm de espessura como substrato, a qual foi seccionada através do processo de “oxicorte”, tendo sua composição química apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço API 5L X70.

C	Mn	P	S	Si	Al	Nb	V	Ti	Cr	Ni	N	Ce
0,09	1,46	0,0016	0,003	0,24	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03	0,01	0,006	0,35

Fonte: (USIMINAS, 2011).

Para otimização dos parâmetros do processo: velocidade de alimentação do arame (V_a), tensão de soldagem (U) e DBPC, foi estabelecido um planejamento experimental fatorial em dois níveis com três repetições no ponto central, que está apresentado na Tabela 2, sendo diferenciados os níveis codificados e reais, representando os níveis mínimos, médios e máximo.

Tabela 2 – Níveis reais e codificados dos fatores em estudo: tensão de soldagem (U), velocidade de alimentação do arame (V_a) e DBCP.

Variáveis independentes	Níveis codificados e reais		
	-1	0	1
U (V)	20	25	30
V_a (m/min)	6	7,5	9
DBCP (mm)	20	24	28

Fonte: Autor.

Nesse trabalho, a representação fatorial é composta por dois diferentes níveis e três variáveis ($2^3 + 3$), totalizando oito experimentos e mais três, que serão os pontos centrais (PC). Os experimentos foram realizados em ordem aleatória. Permitindo que fosse calculada a significância dos efeitos, bem como a construção de intervalos de confiança, de modo a diminuir o erro experimental (NEVES et al, 2002). A Tabela 3 apresenta a matriz de planejamento completo para o estudo.

Tabela 3 – Matriz de planejamento experimental 2^3 mais a réplica do ponto central.

Experimentos	U (V)		V_a (m/min)		DBPC	
1	20	-	6	-	20	-
2	30	+	6	-	20	-
3	20	-	9	+	20	-
4	30	+	9	+	20	-
5	20	-	6	-	28	+
6	30	+	6	-	28	+
7	20	-	9	+	28	+
8	30	+	9	+	28	+
9	25	0	7,5	0	24	0
10	25	0	7,5	0	24	0
11	25	0	7,5	0	24	0

Fonte: Autor.

A soldagem foi realizada por uma fonte multiprocessos, que tem a capacidade de soldar diversos tipos de soldagem, tendo corrente máxima de 800 A, fabricado pela IMC Soldagem,

conforme a Figura 2. A proteção gasosa foi feita por uma mistura gasosa de Argônio e Hélio (70% Ar e 30% He).



Figura 2 – Equipamento de soldagem MIG.
Fonte: SANTOS, 2014.

As deposições foram realizadas por soldagem de revestimento MIG, utilizando a liga Inconel 625 (AWS ER NiCrMo-3) na forma de arame, com diâmetro de 1,2 mm, cuja composição química está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição química (% em peso) do metal de adição na forma de arame.

%	Ni	Cr	Mo	Fe	C	Mn	Si	P	S	Co	Nb+Ta	Al	Ti
Mínimo	58,0	20,0	8,0								3,15		
Máximo		23,0	10,0	5,0	0,10	0,50	0,50	0,015	0,015	1,00	4,15	0,40	0,40

Fonte: Bealloy.

Outros parâmetros associados ao processo, que foram fixos durante o trabalho, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – parâmetros fixos utilizados no processo.

Outros Parâmetros	
Vazão (m³/min)	20
Diâmetro do arame (mm)	1,2
Velocidade de Soldagem (cm/s)	20
Gases de proteção (%)	70 Ar – 30 He

Fonte: Autor.

Para a deposição dos revestimentos, foi feito um sequenciamento de passes respeitando um comprimento inicial “L” para o primeiro passe, de forma subsequente, o segundo passe foi iniciado em $\frac{L}{2}$ e prosseguiu até $\frac{3L}{2}$, sendo seguida a mesma lógica para o terceiro e último passe, como pode ser ilustrado na Figura 3. A temperatura de interpasse foi de 100°C.

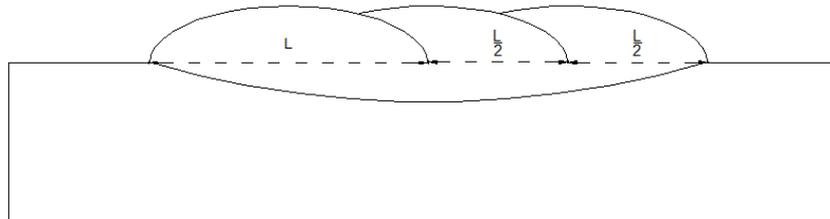


Figura 3 - Esquema do sequenciamento de passes.
Fonte: Autor.

Para a confecção dos corpos de prova, foi utilizada uma cortadeira metalográfica Fortel CF III, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 4 - Cortadeira utilizada no corte dos corpos de prova.
Fonte: Autor.

Com as amostras cortadas, foi feito o embutimento a frio, utilizando resina de poliéster, conforme apresentado na Figura 5.



Figura 5 - Amostras embutidas.
Fonte: Autor.

As amostras passaram por tratamento metalográfico através de lixamento, fazendo-se uso da lixadeira e politriz da marca Fortel e modelo PLFDV, conforme a Figura 6. As granulometrias utilizadas foram de: 100, 120, 220, 320, 400, 600, 800, 1000 e 1200, com frequência, em rpm, de 400, 380, 360, 340 e 300, variando da menor até a maior numeração das lixas.



Figura 6 - Lixadeira e Politriz.
Fonte: Autor.

Para a cálculo dos valores de penetração e de diluição, foi utilizado o *software* “ImageJ”.

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.

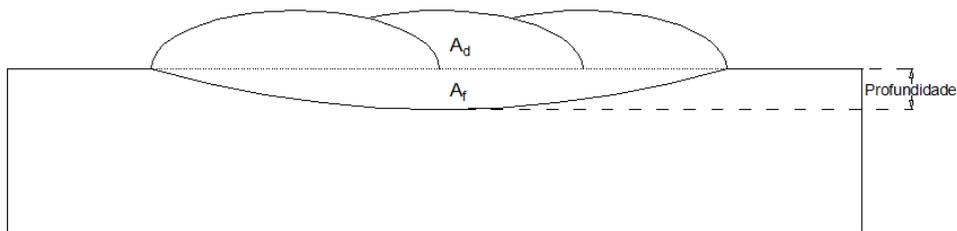


Figura 7 - Esquema para o cálculo da diluição.
Fonte: Autor.

$$D(\%) = \frac{A_f}{A_f + A_d} * 100 \quad (1)$$

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

Para a análise de resistência à corrosão, foram feitas as seguintes medidas eletroquímicas de corrosão: E_{corr} , R_p e I_{corr} através da técnica de polarização potenciodinâmica linear. O equipamento utilizado foi o potenciostato/galvanostato PG STATE302N da Autolab, conforme ilustrado na Figura 8. O equipamento funciona com auxílio de uma placa de interface PCI instalada em um computador, que possui o software, NOVA 1.9, para a aquisição de dados.



Figura 8 - Potenciostato/Galvanostato PG STATE30 da Autolab.
Fonte: Autor.

Através da Figura 9, verifica-se a região que foi exposta ao ensaio de corrosão, sendo esta área de aproximadamente 1 cm², localizada no reforço do revestimento.

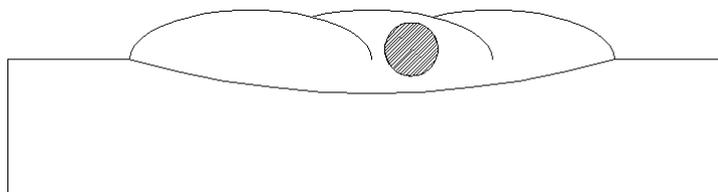


Figura 9 - Esquema de análise da corrosão.
Fonte: Autor.

A avaliação foi realizada utilizando uma célula eletroquímica no interior de uma gaiola de Faraday, à temperatura ambiente, como pode ser visto no esquema da Figura 10. Para o meio corrosivo, foram utilizados 60 ml de solução de NaCl 1M, um eletrodo de prata - cloreto de

prata (Ag/AgCl), como o eletrodo de referência, e como contra eletrodo, foi utilizado um fio de platina em forma de espira para aumentar a superfície de contato. O eletrodo de trabalho foi a amostra de aço API 5L X70, revestida com a liga de níquel inconel 625.

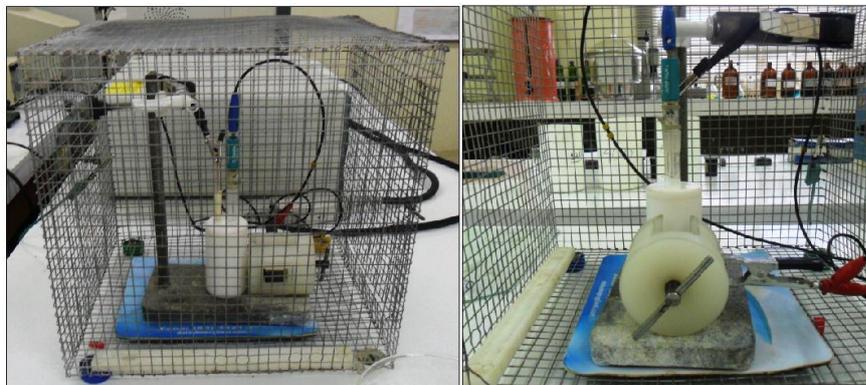


Figura 10 - Célula eletroquímica e Gaiola de Faraday para análise de corrosão.
Fonte: SANTOS, 2014.

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 6 apresenta a matriz de planejamento fatorial 2^3 mais três pontos centrais e os resultados experimentais das deposições por soldagem, com relação as variáveis dependentes: d (%), teor de ferro (%), E_{corr} , R_p e I_{corr} , variando-se as variáveis independentes: tensão (U), velocidade de alimentação (V_a) e DBCP.

Tabela 6 - Matriz de planejamento fatorial 2^3 e resultados obtidos por MIG.

Parâmetros/ Experimentos	U (V)	DBCP (mm)	V_a $\left(\frac{m}{min}\right)$	D (%)	Fe (%)	R_p (K Ω)	E_{corr} (V)	I_{corr} (A)
1	20	20	6	9,46	7,78	343,22	-0,639	10,16
2	30	20	6	10,35	8,10	341,87	-0,682	10,85
3	20	20	9	9,33	7,63	343,98	-0,640	10,13
4	30	20	9	14,60	9,66	299,34	-0,704	11,17
5	20	28	6	5,80	4,64	475,66	-0,525	8,35
6	30	28	6	11,80	8,82	314,44	-0,691	10,99
7	20	28	9	6,53	4,81	433,12	-0,550	8,75
8	30	28	9	15,01	16,84	230,96	-0,720	11,61
9	25	24	7,5	8,15	6,38	363,97	-0,598	9,51
10	25	24	7,5	8,24	7,10	347,96	-0,620	9,86
11	25	24	7,5	8,10	6,19	404,54	-0,558	8,88

Fonte: Autor.

De acordo com os resultados obtidos com o método experimental de planejamento fatorial, foram geradas Equações (2, 3, 4, 5 e 6), que representam uma linearização das superfícies de resposta, relacionando as variáveis dependentes (D, Fe, R_p, E_{corr} e I_{corr}) em função das independentes (U, V_a e DBCP).

$$D_{(U, V_a)} = 47,256 - 1,589*U - 2,096*V_a + 0,052*24*U + 0,114*U*V_a - 0,037*24*V_a - 33,975; \quad (2)$$

$$Fe_{(U, V_a)} = 96,215 - 2,81*U - 6,573*V_a + 0,087*24*U + 0,159*U*V_a + 0,141*24*V_a - 75,945 \quad (3)$$

$$R_p_{(U, V_a)} = - 1148,511 + 47,903*U + 63,239*V_a - 1,984*24*U - 1,404*U*V_a - 1,756*24*V_a + 1600,478 \quad (4)$$

$$E_{corr_{(DBCP, U)}} = -1,492 + 0,026*DBCP*U - 0,001*DBCP*U - 0,0004*7,5*DBCP - 0,0006*7,5*U + 0,146 \quad (5)$$

$$I_{corr_{(U, DBCP)}} = 25,30 - 0,456*U - 0,785*DBCP + 0,023*U*DBCP + 0,009*7,5*U + 0,015*7,5*DBCP - 3,7 \quad (6)$$

Sendo:

U = Tensão; V_a = Velocidade de Alimentação; DBCP = Distância do Bico de Contato à Peça; e U*V_a e DBCP*U as interações entre as variáveis.

Pode-se observar na Tabela 6, que os valores de diluição variaram de 5,80 até 15,01 %, sendo referentes aos experimentos 5 e 8, respectivamente. Os experimentos 2, 4, 6 e 8 foram aqueles que se encontraram dentro da faixa que Murugan e Parmar, (1997) indicam que pode haver continuidade das propriedades anticorrosivas. Nesse caso, foram levados em consideração, revestimentos de aços austeníticos (309L e 316L), depositados em substrato de aço estrutural IS 2062. Porcentagens acima de 15 % de diluição seriam indicadores de um excessivo teor de ferro no metal de solda, o que acarretaria uma possível formação de elementos corrosivos na superfície da liga formada. Fatos também verificados por Gomes, (2010), que utilizou o processo de eletrodo tubular com revestimento AWS E 71T-1 em substrato de aços ao carbono 1020 ABNT.

Verifica-se que na Figura 11A, apenas a tensão apresentou influência estatisticamente significativa sobre a diluição, já os outros parâmetros e suas respectivas interações: DBCP e velocidade de alimentação não apresentaram, obtendo-se um ajuste R² de 87,73 %, com confiabilidade estatística de 95 %. O valor positivo no coeficiente da tensão representa que com um maior valor de tensão, deve-se obter uma maior diluição.

Analisando os dados apresentados na Figura 11B, verificou-se através da superfície de resposta, que os maiores patamares de diluição foram encontrados com tensão de 30 V, aliada

a velocidade de alimentação de 9 m/min, com DBCP em 24 mm, gerando um resultado superior a 14 %, o que corrobora com o resultado encontrado no experimento 8, no qual foram utilizados os mesmos parâmetros para a obtenção do revestimento, com exceção da DBCP, que também foi máxima.

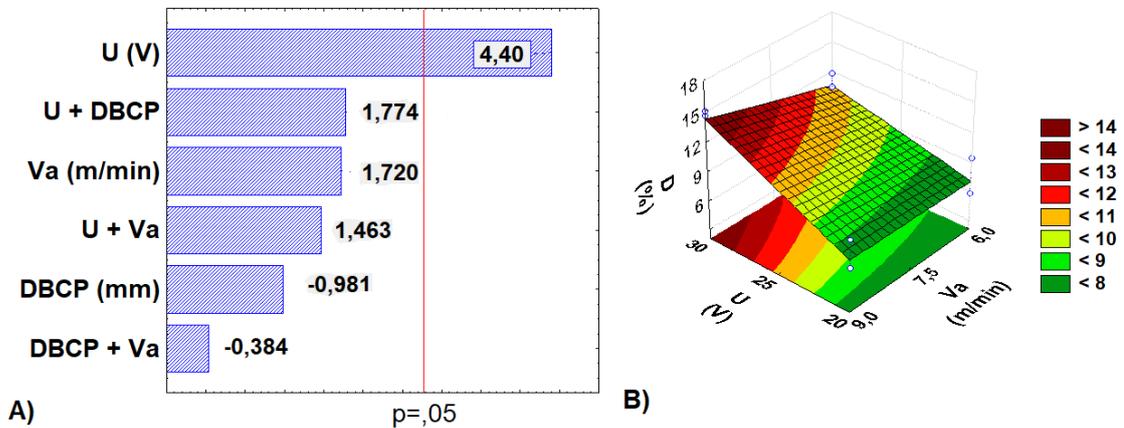


Figura 11 - (A) Gráfico de Pareto para os efeitos das variáveis independentes sobre a diluição (D) [%]. (B) Superfície de resposta da Diluição *versus* Tensão *versus* velocidade de alimentação $R^2 = 87,73\%$.
Fonte: Autor.

Pode-se notar que para o mesmo valor de tensão, a diluição tende a diminuir com a redução da velocidade de alimentação. Este comportamento é o esperado, uma vez que há uma menor quantidade de material sendo depositada na superfície do metal de base. Também verificados por Sonasale, (2014), que utilizou soldagem MIG com eletrodo AWSER 70S-6 e, com a variação de tensão e velocidade de alimentação do arame, além de outros parâmetros, verificou que a diluição aumentava de forma diretamente proporcional a esses. Outro trabalho também verificou essas mudanças, CHOTEBORSKÝ et al, (2011), utilizou “OK Tubrodur 15.43” como eletrodo, depositado sobre aço S235JR, chegando a resultados semelhantes, em relação à variação dos parâmetros citados.

Esses mesmos resultados podem ser vistos nos pares de experimentos 1 e 2, 3 e 4, 5 e 6, 7 e 8, nos quais somente a tensão, dos parâmetros de soldagem foi modificada, de 20 V para 30 V e como consequência, a diluição teve um incremento, mantendo os demais parâmetros de soldagem fixos, com relação aos pares mencionados. Como observado por Pessoa et al, (2009) ao utilizar soldagem MIG/MAG em revestimentos de Inconel 625 em substrato de aço baixo carbono ASTM A36.

Como citam Correia et al, (2016), ao utilizar um eletrodo ER70S-6 depositado em chapas de aço carbono AISI1020 através de um processo MIG, que ao variar a velocidade de alimentação, os valores de diluição tendem a aumentar de forma diretamente proporcional a

esse parâmetro, devido a um aumento da corrente no arco elétrico, aumentando a diluição. Reassumindo o que foi citado ao fim do parágrafo anterior, a velocidade de alimentação para os pares de amostras 1 e 3, 2 e 4, 5 e 7 e, por último 6 e 8 que foram incrementadas em 3 m/min, levando assim, a um aumento nas suas respectivas diluições.

Com relação à variação da distância entre o bico de contato e peça, Lopes et al, (2017), indicam que, com o aumento nos valores de DBCP, há uma diminuição nos valores de diluição adquiridos nos experimentos, já que a quantidade de material, além da maior altura em que estarão fluindo, farão com que haja uma menor penetração, bem como um aumento na largura e, de modo geral, mantêm-se os outros parâmetros de soldagem constantes, podendo-se avaliar, portanto, que o aumento nos valores de DBCP acarretará em uma diminuição na diluição.

Essas mudanças podem ser verificadas de 1 para 5, 3 para 7, mas não seguem as mesmas características de 2 para 6 e 4 para 8, nos quais a diluição aumenta para um aumento na DBCP, o que pode indicar que a partir de uma certa altura, a diluição não tenha uma dependência acentuada pela distância do bico de contato à peça, com relação aos demais parâmetros de soldagem.

De acordo com a Tabela 6, os valores de teor de ferro variaram de 4,64 % (experimento 5) até 16,84 % (experimento 8). Ao observar a Figura 12A, o gráfico de Pareto demonstra que somente a tensão, dentre todas as variáveis e suas respectivas interações, apresenta significância estatística com relação à mudança nos valores do teor de ferro, podendo-se observar que com o aumento da tensão de soldagem, a porcentagem de ferro também se elevará, por conta do coeficiente positivo da coluna “U” do gráfico de Pareto. Foi calculado o coeficiente de correlação R^2 , que foi de 87,53 %, tendo um intervalo de confiança de 95 %.

Também foi construída a superfície de resposta através da análise estatística, que pode ser observada na Figura 12B. Aumentando os valores de tensão (U) e velocidade de alimentação (V_a) de 20 a 30 V e de 6 a 9 m/min, respectivamente e mantendo-se a DBCP constante em 24 mm, chega-se a teores de Fe maiores que 12 %. Isso é explicado pelo maior comprimento do arco elétrico gerado, além da maior quantidade de material depositado no cordão de solda por conta do maior aporte térmico e da maior velocidade de alimentação que, além de aumentar a penetração e a diluição, aumenta também a largura do cordão. Resultados próximos foram encontrados por Aguiar, (2010), no qual foram utilizadas diversas ligas de níquel, dentre essas a Inconel 625, que foi depositada em substrato de aço ASTM 516 Gr 60 por MIG.

Correlacionando esses efeitos com os experimentos realizados, percebe-se no experimento 8, que utilizou os mesmos parâmetros, porém com a DBCP de 28 mm, resultou porcentagem

de 16,84 %, aliando-se com o valor de 15,01 % de diluição desse mesmo experimento, uma vez que esses fatores indicam que pode-se haver uma maior propensão à corrosão, visto que, com maiores diluições haverá maior participação do metal de base na constituição do metal de solda e, invariavelmente, a porcentagem de ferro na área analisada aumenta.

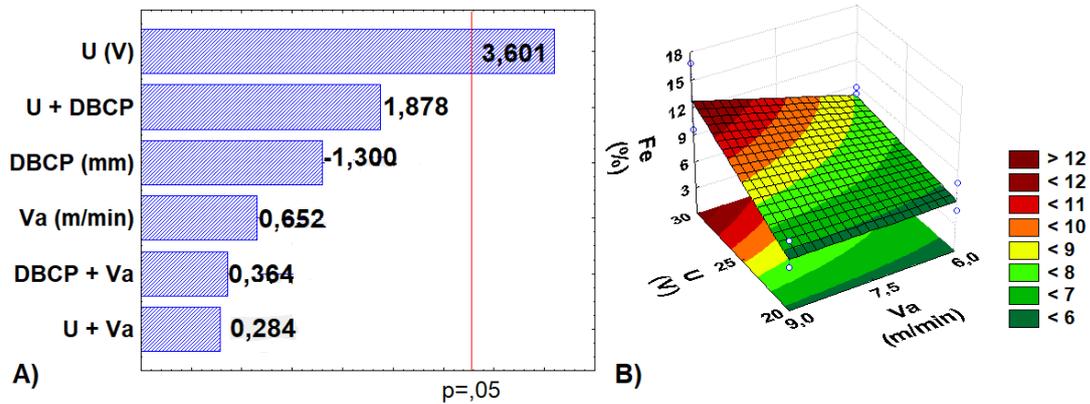


Figura 12 - (A) Gráfico de Pareto para os efeitos das variáveis independentes sobre o teor de ferro (Fe) [%]. (B) Superfície de resposta do teor de ferro *versus* U *versus* velocidade de alimentação (V_a). $R^2 = 87,53 \%$

Fonte: Autor.

Pode-se observar pela Tabela 6 que os valores de R_p variaram de 230,96 $K\Omega$ (experimento 8) até 475,66 $K\Omega$ (experimento 5). Através da Figura 13A, o gráfico de Pareto foi plotado e mostrou que dois parâmetros têm significância estatística em relação à resistência à polarização, sendo estes: tensão (U) e a interação entre a tensão (U) e DBCP. Além disso, os valores negativos dos coeficientes mostram que com a diminuição desses parâmetros, há um aumento da resistência à polarização e, como consequência, deve-se haver a continuidade de propriedades anticorrosivas.

A superfície de resposta da Figura 13B foi construída através da variação da tensão (U) e velocidade de alimentação (V_a) de 20 a 30 V e 6 a 9 m/min, respectivamente, mantendo-se constante a DBCP em 24 mm. Através dessa construção, percebe-se que com a diminuição da tensão e da velocidade de alimentação, a resistência à polarização é levada a patamares maiores que 460 $K\Omega$. A amostra 5 é um exemplo, na qual foram utilizados valores máximos de tensão e velocidade de alimentação, além da DBCP de 28 mm.

O coeficiente de correlação linear R^2 foi calculado e teve um valor de 93,166 %, além de uma significância estatística de 95 %.

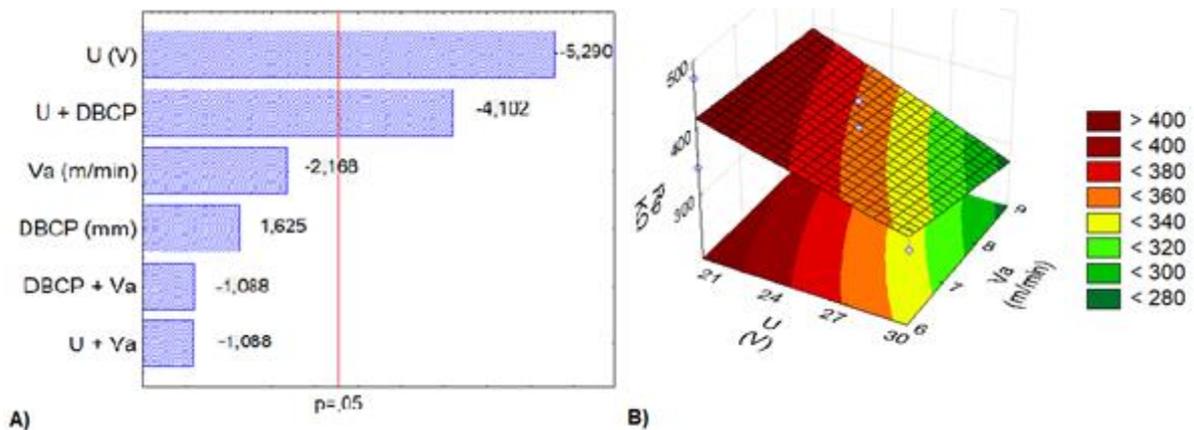


Figura 13 - (A) Gráfico de Pareto para os efeitos das variáveis independentes sobre a resistência à polarização (R_p) [KΩ]. (B) Superfície de resposta da resistência à polarização *versus* U *versus* velocidade de alimentação (Va). $R^2 = 93,166\%$

Fonte: Autor.

Pode-se relacionar, também através da Tabela 6, que os valores do potencial de corrosão (E_{corr}), que por sua vez ficaram em uma faixa entre -0,720 (8) V e -0,525 (5). Polinski, (2017), encontrou resultados que estão de acordo com os abordados nesse estudo, utilizando soldagem MIG/MAG em substrato de aço duplex SAF 2205, depositando o arame OK Autrod 22.09 como revestimento.

Pela análise da Figura 14A, o gráfico de Pareto mostra que o único parâmetro que teve significância estatística no potencial foi a tensão (U), sendo que todas as restantes e suas respectivas interações, não apresentaram essa característica. O valor negativo do coeficiente da tensão de soldagem indica que o potencial de corrosão, E_{corr} , varia de forma inversamente proporcional à tensão, ou seja, com a diminuição da tensão, o potencial aumentará.

Assim, pode-se construir a superfície de resposta da Figura 14B, na qual verificou-se que com a diminuição da tensão (30 – 20 V) e o aumento da distância do bico de contato à peça (20 – 28 mm), mantendo a velocidade de alimentação constante em 7,5 m/min, há um aumento nos valores de E_{corr} , chegando a patamares maiores que 0,56 V.

Nos experimentados desse trabalho, pode-se comparar com as amostras 5 e 7, que foram realizadas com valores de tensão e DBCP equivalentes aos encontrados na superfície de resposta, porém com velocidade de alimentação diferentes, sendo essas 6 e 9 m/min, respectivamente. O coeficiente de correlação linear R^2 foi equivalente 82,048 %, com confiabilidade estatística de 95 %.

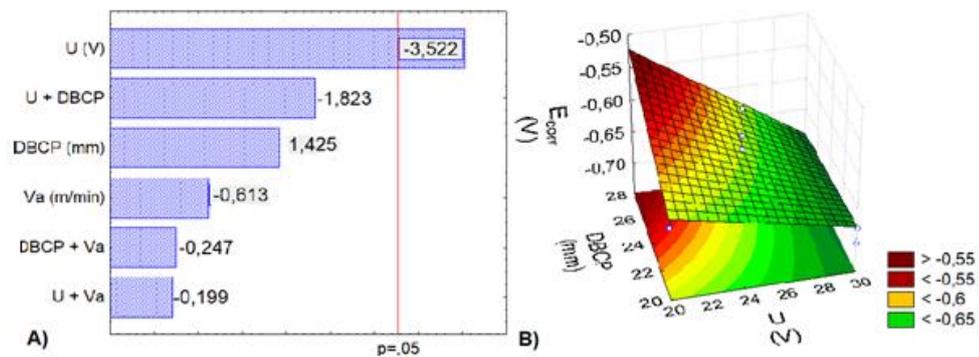


Figura 14 - (A) Gráfico de Pareto para os efeitos das variáveis independentes sobre o potencial de corrosão (E_{corr}) [V]. (B) Superfície de resposta do potencial de corrosão *versus* DBCP *versus* U. $R^2 = 82,048 \%$.

Fonte: Autor.

Os valores de corrente de corrosão (I_{corr}), variaram de 8,35 A (experimento 5) até 11,61 A (experimento 8), como pode ser observado através da Tabela 6. Obteve-se também, o coeficiente de correlação linear R^2 , tendo uma resposta de 82,476 % com uma significância estatística de 95 %.

Através da Figura 15A, pode-se observar o gráfico de Pareto, no qual tem-se a tensão (U) como a única variável independente que teve significância estatística na variação da corrente de corrosão. Com o aumento da tensão, a corrente de corrosão também se eleva, como pode-se observar no mesmo gráfico.

E através da Figura 15B, pode-se analisar a superfície de resposta gerada através das respostas obtidas no gráfico de Pareto. Foi construída ao variar os valores de tensão de 20 – 30 V e a DBCP de 20 – 28 mm, fazendo com que a velocidade de alimentação ficasse constante em 7,5 m/min.

Analisa-se que com o aumento da tensão e da DBCP, a corrente de corrosão tem o mesmo comportamento, o que confirma os dados obtidos no gráfico anterior e, assim, há uma tendência de aumento na taxa de corrosão, com diminuição das propriedades anticorrosivas, chegando a um patamar máximo maior que 11 A. Isso pode ser confirmado através da amostra 8, que utilizou os valores máximos de tensão, DBCP e velocidade de alimentação.

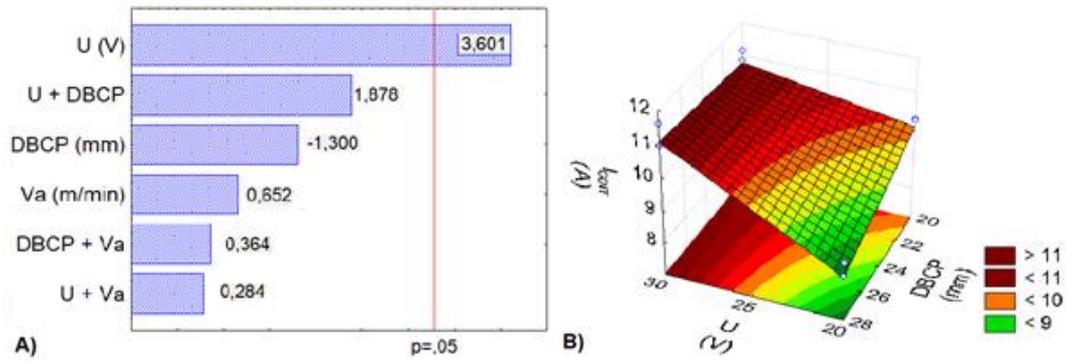


Figura 15 - (A) Gráfico de Pareto para os efeitos das variáveis independentes sobre a corrente de corrosão (I_{corr}) [A]. (B) Superfície de resposta da corrente de corrosão *versus* U *versus* DBCP. $R^2 = 82,476\%$.

Fonte: Autor.

A resistência à corrosão foi avaliada através da técnica de polarização potenciodinâmica linear (PPL), demonstrada na Figura 16, que apresenta as curvas de polarização das respostas de $\log I$, densidade de corrente, por E_{corr} , potencial de corrosão, dos dois experimentos opostos, em relação à diluição e do aço API 5L X70, sem deposição de revestimento.

Tem-se que o experimento 5 apresenta um valor de E_{corr} mais positivo que o 8, que por sua vez apresentou comportamento próximo ao do aço sem revestimento, indicando que deve ser aplicada uma diferença de potencial mais elevada para que haja corrosão no corpo de prova do experimento 5, aliado ao fato de que o primeiro, além de ter tido uma menor diluição, como já mencionado, também apresentou mais três fatores que auxiliam na percepção dos seguintes resultados: os valores de teor de ferro (4,64 – 16,84 %) e a corrente de corrosão (8,35 – 11,61 A) foram menores para o experimento 5, o que favorece às propriedades anticorrosivas, além da resistência à polarização ter sido maior para o mesmo (475,66 K Ω).

Comportamentos semelhantes foram encontrados por Souza, (2019), que utilizou soldagem MIG/MAG em aço inoxidável duplex AISI/UNS S31803 como metal de base e AWS ER2209 como metal de adição.

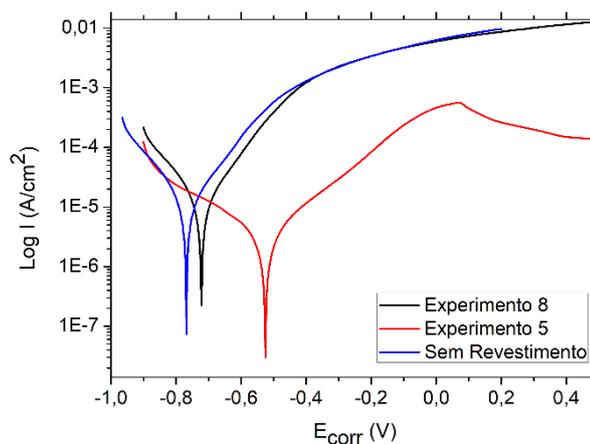


Figura 16 - Curva de polarização dos experimentos com maior (experimento 8) – em preto - e menor (experimento 5) – em vermelho - diluição, além do aço API 5L X70 sem revestimento – em azul.
Fonte: Autor.

3. CONCLUSÕES

A utilização do planejamento fatorial foi satisfatória para a obtenção dos melhores resultados, tanto de diluição e de composição química, quanto de corrosão nos experimentos.

Para alcançar o menor resultado de diluição, utilizou-se: tensão (20 V) e velocidade de alimentação (6 m/min), além de uma DBCP de 28 mm, gerando um valor de 5,80 % para a amostra 5. Também foram gerados, para essa amostra, menores: teor de Fe e I_{corr} (4,64% e 8,35 A); e maiores: E_{corr} e R_p (-0,525 V e 475,66 KΩ).

O processo de soldagem MIG foi utilizado com sucesso para soldagem de revestimento e os objetivos citados foram cumpridos.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, W.M. **Revestimento por soldagem MIG/MAG empregando ligas de níquel para aplicações em componentes do setor de petróleo e gás natural**. 255 f. Tese (Doutorado em Ciência de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/16201>. Acesso em: 21 jan. 2019.

AKCA, E.; GURSEL, A. A Review on Superalloys and IN718 Nickel-Based INCONEL Superalloy. **Periodicals of Engineering and Natural Sciences**, v. 3, n. 1, p. 15-27, 2015. Disponível em: <<http://pen.ius.edu.ba/index.php/pen/article/viewFile/43/47>>. Acesso em: 21 jan. 2019.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). **Specification For Linepipe: ANSI/API specification 5L**. 44 ed. Chicago, 2007. Disponível em: <https://www.hu-steel.com/attached/file/20160920/20160920112156975697.pdf> Acesso em: 21 jan. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements**. p. 59–97. Pensilvânia, 1997.

BATISTA, V.R. et al. Influência dos parâmetros de soldagem sobre as características de revestimentos de liga níquel aplicados em aços API 5L GrB. CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS – CBECIMAT, 2010, São Paulo. **Anais** [...] São Paulo: ABM; 2010. p. 6534-6543. Disponível em: <http://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/download/1975/1001>. Acesso em: 25 jan. 2019.

BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. **Statistics for experimenters: Design, Innovation, and Discovery**. New York: John Wiley, 2005. 655 p. Disponível em: <http://ai3.itb.ac.id/~basuki/presentasi/ebook/statistics%20for%20experimenters%20%20box%20and%20hunter.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2019.

CHOTEBORSKÝ, R.; NAVRÁTILOVA, M.; HRABE, P. Effects of MIG process parameters on the geometry and dilution of the bead in the automatic surfacing. **Research in Agricultural Engineering**, v. 57, n.1, p. 56–62. 2011. Disponível em: <https://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/42200.pdf> Acesso em: 30 jan. 2019.

CORREIA, F.C.; KRUNG, G.E.; OGATA, P.H.; MORAIS, D. Correlação entre a velocidade de soldagem e da alimentação do arame no processo de soldagem GNAW com a geometria, microestrutura e macroestrutura do cordão de solda. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS – CBECIMAT, 22, 2016, Natal. **Anais** [...]. Natal: CBECIMAT, 2016. p. 01 - 11. Acesso em: <http://www.metallum.com.br/22cbecimat/anais/PDF/304-157.pdf> Acesso em: 05 de jun. 2019.

DNV. Submarine Pipeline Systems. **DNVGL-ST-F101**, 2017. Disponível em: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnvgl/st/2017-12/DNVGL-ST-F101.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2019.

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: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-30032012-121048/publico/Tese_Paulo_Eduardo_Alves_Fernandes.pdf. Acesso em: 21 jan. 2019.

FORD, F. P. Mechanisms of environmentally assisted cracking. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 40, n. 5, p. 343–362. 1989. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0308016189900975>. Acesso em: 02 fev. 2019.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 5 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2007.

GOMES, J.H. **Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico** [Dissertação]. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2010. Disponível em: <https://saturno.unifei.edu.br/bim/0036333.pdf>. Acesso em: 24 maio. 2019.

LOPES, P.E.K.; MACHADO, A.A.; COLAÇO, F.H.G. Efeito do ângulo da tocha na penetração do cordão com transferência metálica por spray. **9º Congresso brasileiro de engenharia da fabricação**. Instituto Federal de Santa Catarina, Joinville. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319995083_EFEITO_DO_ANGULO_DA_TOCHA_NA_PENETRACAO_DO_CORDAO_COM_TRANSFERENCIA_METALICA_POR_SPRAY. Acesso em: 30 mar. 2019.

IGNATIADIS, I.; AMALHAY, M. Experimental study of corrosion of two stainless steels during the oxidative bacterial dissolution of pyrite using mass loss and electrochemical techniques. **International Journal of mineral processing**, v.62, p.199-215, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/international-journal-of-mineral-processing/vol/62/issue/1>. Acesso em: 31 mar. 2019.

MARKESSET, T.; MORENO, J.; KUMAR, R. Maintenance of subsea petroleum production systems: a case study. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 19, n. 2, p. 128–143. 2013. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/13552511311315940/full/html>. Acesso em: 14 abr. 2019.

MONTGOMERY, D.C. **Introduction to statistical quality control**. 6.ed. New York: John Wiley; 2009. Disponível em: <http://dl4a.org/uploads/pdf/581SPC.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2019.

MURUGAN, N.; PARMAR, R.S. Stainless steel cladding deposited by automatic gas metal arc welding. **Welding Research Supplement**, v. 10, n. 1, p. 391-400. 1997. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/290031081_Stainless_steel_cladding_deposited_by_automatic_gas_metal_arc_welding. Acesso em: 20 jun. 2019.

NEVES, C.F.C.; SCHVARTZMAN, M.M. Variables search technique applied to gas separation. **Química Nova**. v.25, n 2, p.327-329, 2002. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422002000200022. Acesso em: 17 jun. 2019.

NORSWORTHY, R. Understanding corrosion in underground pipelines: basic principles. **Underground Pipeline Corrosion**: Elsevier, p. 3–34. 2014. https://www.researchgate.net/publication/288497912_Understanding_corrosion_in_underground_pipelines_Basic_principles. Acesso em: 17 jun. 2019.

NOURI, M.; ABDOLLAH, A.; MALEK, F. Effect of welding parameters on dilution and weld bead geometry in cladding. **Journal of Materials Science and Technology**. v. 23, n. 6, p. 817-822. 2007. Acesso em:

https://www.researchgate.net/publication/266895217_Effect_of_Welding_Parameters_on_Dilution_and_Weld_Bead_Geometry_in_Cladding. Acesso em: 18 jun. 2019

PARANHOS, R. P. R.; SOUZA A. C. **Soldagem a arco submerso**. Rio de Janeiro: SENAI/RJ-CETEC de Solda, 1999. 77 p.

PESSOA, A.; AGUIAR, W.; MIRANDA, H.; FARIAS, J.; FILHO, F. Avaliação das características geométricas dos cordões de solda realizados através do processo MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito empregando o eletrodo ERNiCrMo-3. CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 5, 2009, Fortaleza. **Anais** [...] Fortaleza: CBPG; 2009. p. 1-9. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242012000300011. Acesso em: 11 jun. 2019.

PESSOA, A.R.P.; MIRANDA, H.C.; FARIAS, J.P.; AGUIAR, W.M.; FILHO, F. de A. Seleção de Parâmetros Através do Método Taguchi para Soldagem de Revestimento com Ligas de Níquel pelo Processo MIG/MAG. **Revista Soldagem & Inspeção**. São Paulo, v. 15, n. 4, p.317-324, Out/Dez 2010. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-92242010000400009&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 21 jun. 2019.

POLINSKI, E.L. **Influência da energia de soldagem na resistência à corrosão por pites do aço inoxidável duplex SAF 2205**. (Dissertação de mestrado). Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/165210>. Acesso em: 10 jun. 2019.

PONTE, H.A. **Fundamentos da Corrosão**. Curitiba: UFPR, 2003.

RAJENDRAN, S. et al. Corrosion problems in petroleum industry and their solution. **ECB**. Índia, v. 3, n. 3, 2014. Disponível em:

<http://www.eurchembull.com/index.php/ECB/article/view/1334>. Acesso em: 21 jun. 2019.

RODRIGUES, M.I.; LEMMA, A.F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. Campinas: AMIC, 2009. 358 p. Disponível em:

<http://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=937000&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22F%22&qFacets=autoria:%22F%22&sort=ano-publicacao&paginacao=t&paginaAtual=1624>. Acesso em: 21 jan. 2019.

ROHDE, R. **Metalografia – preparação de amostras**: Uma abordagem prática. URI. Apostila. 2010. Disponível em: <http://www.urisan.tche.br/~lemm/metalografia.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2019.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE). **Surface vehicle recommended practice**. Warrendale: SAE J2340, out.1999.

SANTOS, A.; MOURA, T.; SANTANA, R. **Avaliação de revestimentos à base de Inconel 625 depositados através do processo de soldagem GMAW em aço API 5L X70 utilizando Planejamento Fatorial**. Artigo. 2015. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/282412574_Avaliacao_de_Revestimentos_a_base_de_Inconel_625_depositados_atraves_do_Processo_de_Soldagem_GMAW_em_aco_API_5L_X70_utilizando_Planejamento_Fatorial. Acesso em: 10 maio. 2019.

SCHVARTZMAN, M.M.A. et al. Avaliação preliminar da corrosão sob tensão de um aço tipo ABNT 321, em ambientes de reatores nucleares. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DO AÇO INOXIDÁVEL, 7, 2004, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: SMAI, 2004. p. 30-43. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762010000100006. Acesso em: 03 maio. 2019.

SONASALE, P. An Approach to Optimize MIG Welding Parameters by Using Design of Experiments. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**. v. 11, n. 6, ed. 4, p. 72-84. 2014. Disponível em:

<https://pdfs.semanticscholar.org/29ab/9a32199fd0356a3afa98329152c92d4193af.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2019.

SOUZA, D.D.B.G. **Avaliação da Soldabilidade do Aço Inoxidável Duplex UNS S31803 pelo Processo MIG/MAG Curto-circuito Convencional**. 158f. (Tese de Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia. 2019. Disponível em:

<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/25335/3/Avalia%C3%A7%C3%A3oSoldabilidadeA%C3%A7o.pdf>. Acesso em: 08 mar. 2019.

SPECIAL METALS. **Inconel Alloy 625**. West Virginia: Special Metals Corporation. 2013. Disponível em: <http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2019.

THELLAPUTTA, G. R.; CHANDRA, P. S.; RAO, C. S. P. Machinability of Nickel Based Superalloys: A Review. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 2, p. 3712–3721, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317304765>. Acesso em: 12 mar. 2019.

WAINER, E.; BRANDI, S.; MELLO, F. D. H. **SOLDAGEM: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2003.