

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A CORROSÃO DE REVESTIMENTOS À BASE DE NÍQUEL DEPOSITADOS EM AÇOS API 5L X70 POR SOLDAGEM PLASMA PÓ

¹JOSIMÁRIO DO NASCIMENTO JÚNIOR

²Aureliano Xavier dos Santos

RESUMO

As falhas por corrosão são as principais causadoras de vazamento na indústria do petróleo. Por esta razão tem sido muito estudada a utilização de novos materiais com melhores resistências a este fenômeno. Uma das alternativas mais utilizadas, devido ao menor custo envolvido, é a aplicação de revestimentos com estes materiais através de processos de soldagem. Este trabalho tem como objetivo avaliar a resistência à corrosão de revestimentos a base de ligas de níquel em diferentes parâmetros de soldagem através do processo de soldagem a plasma pó em aço API 5L X70. Foi utilizado o processo Plasma Pó (PTA-P) na forma automatizada. Como metal de base utilizou-se chapas do aço API 5L X70 e como metal de adição, a liga à base de Ni, Inconel 625 na forma de pó. A ferramenta de otimização utilizada foi o planejamento experimental completo ²³ mais o ponto central, associado à técnica de metodologia de superfície de resposta (MSR). Foram feitas medidas das características geométrica, diluição, teor de ferro e por fim, foram feitas medidas eletroquímicas de corrosão no revestimento como depositado e após tratamento térmico. os resultados experimentais indicam que menores valores de diluição e teor de ferro, proporcionam elevada resistência à corrosão.

Palavras-chave: Processo PTA-P. Resistência à corrosão. Inconel 625. Tratamento térmico.

ABSTRACT

Corrosion failures are the leading cause of leakage in the oil industry. For this reason, the use of new materials with better resistance to this phenomenon has been very studied. One of the most used alternatives, due to the lower cost involved, is the application of coatings with these materials through welding processes. this work has the objective of evaluating the corrosion resistance of coatings based on nickel alloys in different welding parameters. As base metal using was API 5L X70 steel sheets and as addition metal, it binds to the Ni base of Nickel, Inconel 625 in a powder. as experimental tool was used experimental planning ²³ plus central point, associated to the surface response technique (MSR). The geometric characteristics, dilution, iron content and finally, electrochemical measurements of corrosion were made, were coated and subjected to heat treatment. the experimental results indicate that lower dilution values and iron content provide high corrosion resistance.

Keywords: PTA-P process. Corrosion resistance. Inconel 625. Heat treatment.

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

1 INTRODUÇÃO

O estudo e a pesquisa na área de corrosão de metais que transportam petróleo, são motivados pela indústria de petróleo e gás. Estas indústrias, como a Petrobras, estão cada vez mais sendo desafiadas a explorar em lugares mais distantes da terra, isso após a descoberta do pré-sal, e para isso utilizam tubulações com aço de alta resistência e baixa liga (ARBL) para transportar petróleo bruto e gás. Contudo, os investimentos não param e segundo o plano de negócios da empresa durante o período de 2019 e 2023, será investido um total de US\$84,1 bilhões. A empresa visa também, diminuir os custos cada vez mais com a manutenção corretiva de sua malha dutoviária e para isso, conta com parcerias com universidades, institutos federais e centros de pesquisas no desenvolvimento de pesquisas voltadas para área de combate a corrosão.

No Brasil, segundo Santos; Moura e Santana (2015), dentre os aços ARBL, o aço API 5L X70 é o mais utilizado na fabricação de gasodutos por fornecerem as seguintes características: boa combinação de força e alta resistência mecânica, aliada a boa tenacidade, ductilidade e soldabilidade. Busso e Monteiro (2015) ressaltam que, o processo de fabricação dos dutos de aços ARBL, consta basicamente em conformar plasticamente por laminação e unir as chapas por soldagem. Os processos de soldagem, promovem a formação das zonas termicamente afetada ZTA, devido a ação localizada do calor, que provocam diminuição das propriedades mecânicas como: tenacidade à fratura e possibilidade de surgir trincas.

Estes dutos que formam a malha dutoviária foram desenvolvidos e substituíram os navios de transporte, por serem mais confiáveis quanto a poluição durante o transporte do petróleo e gás. Entretanto, essas tubulações são expostas aos mais variados meios corrosivos tais como: solo, água do mar e atmosfera.

Gentil (1996) define corrosão como sendo, a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos e em alguns casos, pode-se admitir a corrosão como o processo inverso do processo metalúrgico de obtenção dos metais.

Contudo, esses metais podem ter seu tempo de vida útil aumentado, proporcionando uma diminuição dos custos de manutenção pela utilização de alguma técnica de proteção superficial como: metalização por aspersão térmica, galvanização, cladização, eletrodeposição, pintura, difusão, redução química e soldagem de revestimentos.

A técnica conhecida pelo termo *hardfacing*, que é a deposição através de um processo de soldagem, de um revestimento de composição química distinta daquela presente no metal de

base. Bond; Becker e D'oliveira (2011) afirmam que, o objetivo do uso dessas técnicas é de conferir a superfície, propriedades específicas superiores às do metal de base. Melo et al (2011) frisa que, para se obter componentes com um alto grau de resistência química e mecânica, pode-se utilizar as chamadas superligas que são ricas em cobalto (Co) e níquel (Ni). Segundo Vidal (2013), em ambientes corrosivos mais severos, o cromo oferece boa resistência à oxidação química, enquanto o teor combinado de níquel e molibdênio proporciona boa resistência em ambientes não oxidantes. Devido ao elevado teor de molibdênio, a liga Inconel 625 é especialmente resistente à corrosão por pites e corrosão em frestas, este é indicado para os mais variados tipos de meios corrosivos devido a sua composição química

De acordo com Bond; Becker e D'oliveira (2011), o processo de soldagem com plasma com arco transferido, PTA, oferecer excelentes características, dentre elas destacam-se: baixa diluição, pequena extensão da ZTA e microestrutura refinada, O processo PTA surgiu a partir da evolução do processo de soldagem tungstênio inerte gás (TIG). Ambos os processos de soldagem utilizam um eletrodo de tungstênio não consumível que fica no interior da tocha, um bico constritor refrigerado a água, gás de proteção para a poça fundida e o gás de plasma (inerte). Diaz; Dutra e D'oliveira (2010) relatam que, na prática, os parâmetros que controlam a qualidade da solda são: taxa do material de adição, vazão de gás (gás de proteção, gás de plasma, gás de transporte), corrente de soldagem, distância bico-peça e velocidade de soldagem. Lembrando que, a distância bico-peça é a distância entre a face externa do bico constritor até o metal de base e Bond; Becker e D'oliveira (2011) constataram que, ela deve estar com valor próximo de 10 mm, pois, com os testes realizados, percebeu-se que se a distância for muito superior a 10 mm, poderá ocorrer falta de fusão em alguns locais da peça.

Segundo Diaz; Dutra e D'oliveira (2010), a diferença entre ambos os processos de soldagem citados acima está na natureza do material de adição, o primeiro utiliza pó e o segundo arame sólido. Bond; Becker e D'oliveira (2011) afirmam que o PTA é muito utilizado para deposição de revestimentos e isso é fácil de ser justificado, pois ele confere a junta soldada, baixa distorção, uma vez que, para fundir as partículas de pó, a quantidade de calor aplicada a peça é reduzida em comparação com a quantidade necessária para o processo TIG, que utiliza o metal de adição na forma de arame, pequena zona afetada pelo calor, microestrutura refinada e bons valores de diluição com valores entre 6 e 10 %, números muito inferiores aos outros processos de soldagem como o TIG que fornece valores próximos a 20 e 25 % (Bond; Becker e D'oliveira (2011) e Diaz; Dutra e D'oliveira (2010). Devido ao fato de o eletrodo de tungstênio ficar no interior do bico constritor da tocha de soldagem, torna-se difícil a abertura do arco por contato

no processo PTA, sendo então indispensável a utilização de um equipamento, denominado de módulo plasma, para estabelecer a abertura do arco (Diaz; Dutra e D'oliveira 2010).

De acordo com Sandes et al (2016) e Shen et al (2013), é recomendado realizar a operação de tratamento térmico para alívio de tensões residuais, homogeneizar a microestrutura reduzir o teor de hidrogênio, como também manter os níveis de dureza dentro de determinados patamares.

Cortial et al. (1994) estudando o efeito do tratamento térmico para alívio de tensões na microestrutura e nas propriedades mecânicas de depósitos realizados com a liga de níquel 625, observaram um aumento da resistência mecânica e redução na ductilidade devido à precipitação da fase γ no espaço interdendrítico somente para temperaturas superiores a 750°C. No entanto, em trabalhos recentes, Suave et al (2014), observaram o aparecimento desta fase para temperaturas entre 550-750°C.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a resistência à corrosão de revestimentos a base de ligas de níquel em diferentes parâmetros de soldagem através do processo de soldagem a plasma pó em aço API 5L X70.

2 METODOLOGIA

Os materiais de consumo empregados neste trabalho estão agrupados em duas categorias: metal de base (substrato) e os consumíveis: metal de adição e gases de proteção, de plasma e de arraste.

Como metal de base utilizou-se a chapa de aço ARBL API 5L X70 com 19 mm de espessura e composição química apresentada na Tabela 1. Como metal de adição, foi utilizado a liga de níquel Inconel 625 AWS ER NiCrMo - 3 na forma de pó atomizado, apresentando faixa de granulométrica de 60 a 63 μm , cuja composição química está apresentada na Tabela 2. Por fim, utilizou-se o gás argônio puro como gás de proteção, gás de plasma e de araste.

Tabela1- Composição química do aço API 5L X70 (valores % em peso).

C	Mn	P	S	Si	Al	Nb	V	Ti	Cr	Ni	N	Ce
0,09	0,46	0,016	0,003	0,24	0,03	,04	,04	0,02	0,03	0,01	,006	0,35

Fonte: (Usiminas, (2011))

Tabela 2- Composição química (% em peso) do metal de adição na forma de pó.

	Cr	C	Mo	Nb	Fe	Ni
ER NiCrMo – 3	21	0,05	9,2	3,5	3	Balance

Fonte: (Durmat, (2010))

Os equipamentos utilizados se dividem quanto as atividades realizadas. A Figura 1 apresenta a fonte de soldagem eletrônica multiprocesso, com corrente máxima de 800 A, sistema de aquisição de dados para aquisição dos sinais de tensão e corrente e tartilope para deslocamento linear da tocha.

Figura 1- Fonte de soldagem PTA-P.



Fonte: Autor.

Para preparação dos corpos de prova soldados para análise metalográfica foram: cortadeira metalográfica, lixadeira e politriz, máquina fotográfica digital e régua graduada.

E para análise de corrosão foi utilizado o potenciostato/galvanostato PG STATE302N da Autolab, conforme ilustrado na Figura 2. 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 2. Potenciostato/Galvanostato PG STATE30 da Autolab



Fonte: Autor

Para preparação dos corpos de prova a chapa de aço ARBL API 5L X70 foi cortada nas dimensões de (145 x 60 x 19) mm. Para otimização dos parâmetros do processo: corrente (I), velocidade de soldagem (V) e taxa de alimentação (T_x), foi estabelecido um planejamento experimental fatorial, para deposição dos cordões de solda, em dois níveis com 3 repetições do ponto central, conforme apresentado na Tabela 3. Considerando a largura do primeiro cordão como L, utilizou-se uma sobreposição entre os cordões de L/2, conforme ilustrado na Figura 3, procurando sempre manter a temperatura entre os passes próxima a 100 °C. A sequência de combinação dos fatores foi definida segundo a ordem padrão descrita na Tabela 4 com três repetições do ponto central. Os experimentos foram realizados em uma sequência aleatória. A réplica do ponto central permite o cálculo do erro experimental e significância dos efeitos. A

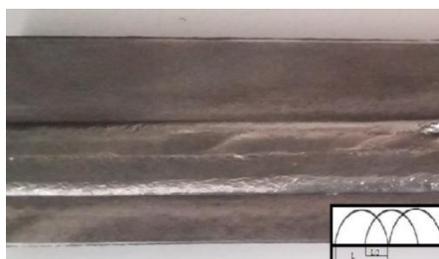
sequência aleatória dos experimentos permite a aplicação de testes estatísticos de significância e a construção de intervalos de confiança.

Tabela 3- Níveis reais e codificados dos fatores em estudo.

Parâmetros	Unidade	Notação	Nível		
			-1	0	1
Corrente	A	I	170	200	230
Velocidade de soldagem	m/min	V _s	8	14	20
Taxa de alimentação	g/min	T _x	25	30	35

Fonte: Autor.

Figura 3: Ilustração da sobreposição do revestimento.



Fonte: Autor.

Tabela 4- Matriz de planejamento experimental 2³ mais 3 ponto central.

Exp.	Variáveis independentes			Parâmetros fixo	
	I (A)	V _s (cm/min)	T _x (g/min)	Recuo do eletrodo	1 mm
1	170	8	25	Diâmetro do bico constritor	3,10 mm
2	230	8	25		
3	170	20	25		
4	230	20	25	Polaridade	Reversa (CC-)
5	170	8	35	Vazão de gás de proteção	10 L/min
6	230	8	35	Vazão de gás de plasma	2,2 L/min
7	170	20	35	vazão de gás de arraste	3 L/min
8	230	20	35	DBP	20 mm
9	200	14	30		
10	200	14	30		
11	200	14	30	Ângulo de ataque	90°

Fonte: Autor.

Para obtenção dos corpos de prova, as chapas de Aço ARBL API 5L X70 com os revestimentos aplicados por PTA-P, foram avaliados superficialmente e em seguida seccionadas no sentido transversal ao cordão de solda conforme esquema apresentado na Figura

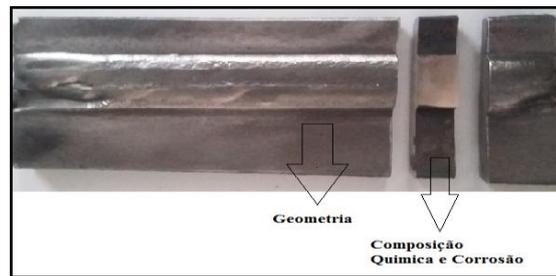
4, para retiradas dos corpos de prova. As amostras obtidas, após corte transversal, foram avaliadas quanto às características geométricas conforme a Figura 5 (largura L, reforço R e penetração P) utilizando um paquímetro para as medições, foi colhida três medidas e feita à média. Já para a medição da penetração e cálculo da diluição foi utilizado o software *Image J*.

A diluição é o percentual do metal de base que se dissolve junto ao metal de adição formando a composição química do metal de solda e pode ser medida em função da área do metal de base fundida e área do metal depositado, conforme a equação 1:

$$D(\%) = \frac{A_f}{A_f + A_d} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

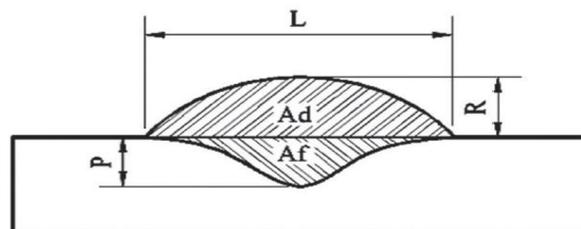
Em função desse comportamento a diluição é uma das mais importantes variáveis que deve sempre ser considerada na soldagem de revestimento. Tendo em vista que vai influenciar diretamente na composição do revestimento, afetando diretamente a resistência à corrosão do mesmo.

Figura 4- Retirada das amostras nas chapas para a realização dos ensaios



Fonte: Autor.

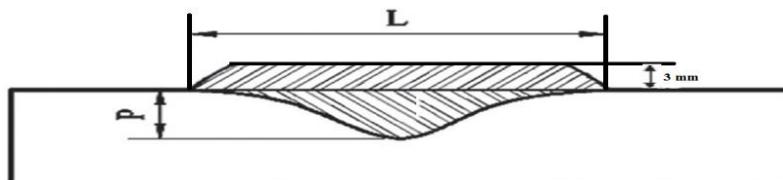
Figura 5- Medição das características geométricas e da área do cordão de solda.



Fonte: PESSOA, 2010.

A superfície das amostras foi desbastada pelo processo de eletroerosão, deixando-as com uma altura fixa de 3 mm, de acordo com a norma 1707 da Petrobras para revestimentos. A Figura 6 apresenta o perfil do revestimento após a etapa de desbaste.

Figura 6- Perfil do revestimento após o processo de eletroerosão.

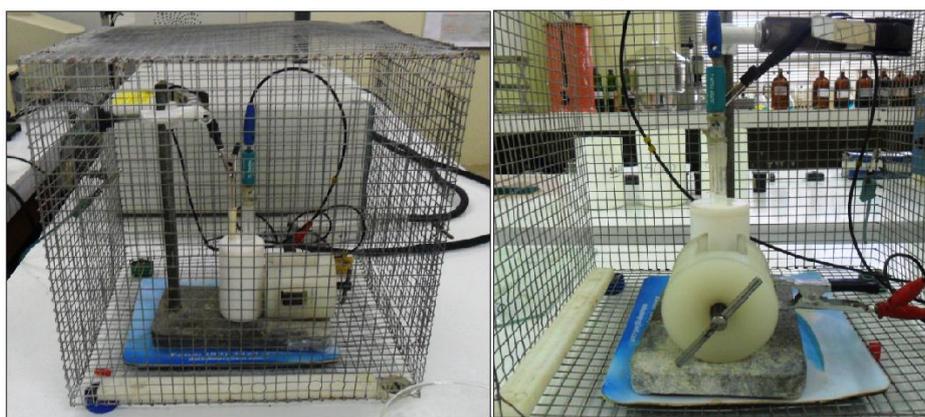


Fonte: PESSOA, 2010.

Em seguida, foi realizada a análise química de composição do revestimento desbastado para determinar o teor de ferro do revestimento, a qual foi realizada por EDX - Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio X) na região da seção usinada dos revestimentos., na mesma região que será submetida à análise de corrosão. As amostras também serão submetidas à análise de resistência à corrosão, por polarização potenciodinâmica linear, a fim de obter as medidas eletroquímicas de corrosão, E_{corr} , R_p e i_{corr} .

Na análise de corrosão foi utilizada uma célula eletroquímica no interior de uma Gaiola de Faraday, conforme esquema apresentado na Figura 7. Como meio corrosivo foi utilizado 60 ml de solução de NaCl 1M, um eletrodo de prata cloreto de prata (Ag/AgCl) como sendo o de referência, e como contra eletrodo foi utilizado um fio de platina em forma de espira para aumentar a superfície de contato. Os eletrodos de trabalho foram as amostras de aço API 5L X70 revestidos com a liga de níquel inconel. As análises foram realizadas à temperatura ambiente.

Figura 7- Célula eletroquímica e Gaiola de Faraday para análise de corrosão.



Fonte: SANTOS,2014.

Por fim, a amostra com o revestimento que apresentou o menor percentual de diluição e teor de ferro, foi submetida ao Tratamento Térmico na presença do fluxo de nitrogênio, com a finalidade de avaliar a influência da temperatura na resistência a corrosão dos revestimentos.

As amostras foram colocadas no forno à temperatura ambiente, as quais foram aquecidas a uma taxa constante de 10 °C/ min nas temperaturas de 500°C, 600°C e 700°C por 1 hora sob atmosférica de nitrogênio a uma taxa de fluxo igual a 120 mL/min.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar as características geométricas e diluição dos revestimentos foi utilizado a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). Dessa forma, foi possível investigar a influência das variáveis independentes (corrente I(A), taxa de alimentação Tx (g/min) e velocidade de soldagem (V_s)) e a forma de interação entre elas, bem como obter o valor das variáveis dependentes que maximizem os resultados esperados.

A Tabela 5 apresenta a matriz de planejamento fatorial 2^3 mais 3 pontos centrais e os resultados experimentais das deposições por soldagem com relação as variáveis dependentes: reforço r(mm), largura L(mm), penetração P(mm), diluição D(%), teor de ferro Fe(%), resistência a polarização Rp(KΩ), potencial de corrosão Ecorr(V) e corrente de corrosão icorr (A). Os experimentos 1 e 8 estão em destaque, pois, foram os resultados de menor e maior diluição respectivamente.

Tabela 5- Matriz de planejamento fatorial 2^3 mais 3 no ponto central e resultados obtidos por PTA-P

Exp.	Variáveis independentes			Variáveis dependentes							
	I (A)	V_s (cm/min)	Tx (/min)	R (mm)	L (mm)	P (mm)	D (%)	Fe (%)	Ecorr (V)	Rp (KΩ)	icorr (A)
1	170	8	25	5,847	23,022	0,78	4,341	3,64	-0,562	6,95	5,70
2	230	8	25	4,933	27,657	1,32	13,82	10,62	-0,608	4,30	18,05
3	170	20	25	4,713	20,256	0,68	5,13	3,96	-0,572	7,45	6,69
4	230	20	25	4,379	17,859	1,85	16,5	13,18	-0,639	9,23	21,54
5	170	8	35	5,902	27,083	0,71	5,586	4,73	-0,578	4,91	7,31
6	230	8	35	4,378	31,482	1,51	16,2	12,88	-0,627	4,58	21,17
7	170	20	35	3,605	18,159	0,36	4,36	3,89	-0,565	4,12	5,79
8	230	20	35	4,103	20,794	1,94	20,54	15,84	-0,643	5,44	26,84
9	200	14	30	4,1	24	0,93	10,20	7,97	-0,601	6,99	13,32
10	200	14	30	4,2	23,8	0,95	10,25	8,27	-0,606	4,30	13,39
11	200	14	30	4,1	24,2	0,91	10,17	6,94	-0,591	8,99	13,28

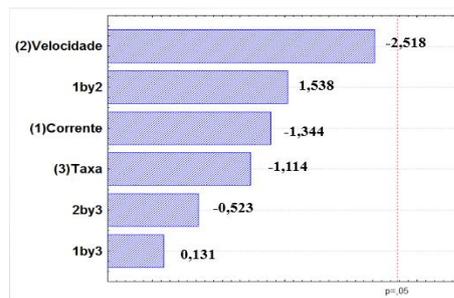
Fonte: Autor.

3.1 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES NO REFORÇO

O reforço variou entre 3,605 mm e 5,902 mm para os experimentos 7 e 5 respectivamente, para todos os experimentos os valores do reforço ficaram acima do que a norma N - 1707 da Petrobras recomenda que é uma altura de 3 mm para o reforço. Para análise de corrosão foi feito um desbaste com o processo de eletroerosão, para deixar as amostras com 3 mm de reforço.

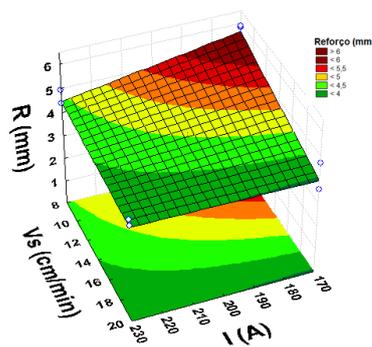
A partir dos valores da Tabela 5 gerou-se o gráfico de Pareto (Figura 8) e com ele pode-se concluir que as variáveis corrente, velocidade de soldagem, taxa de alimentação e a interação entre estas, nenhum valor foi significativo estatisticamente, porém a superfície de resposta (Figura 9), indica que com o aumento da corrente e da velocidade de deposição o reforço diminui. Isso já era esperado pois, os valores dessas variáveis no gráfico de Pareto têm o sinal negativo, indicando ser inversamente proporcional a variável de saída reforço, enquanto a interação entre a corrente e a velocidade tem sinais positivos e isso significa que quanto maior seus valores maiores será o reforço.

Figura 8- Gráfico de Pareto para o Reforço.



Fonte: Autor

Figura 9- Superfície de resposta para o reforço.



Fonte: Autor.

A partir da superfície de resposta, Figura 9, foi obtido um modelo de primeira ordem Equação 2 que relaciona as variáveis dependentes e independentes.

$$R=13,705-0,040*I-0,339*Vs+0,002*I*Vs+0,0002*30*I-0,004*30*Vs-0,976 \quad \text{Eq.2}$$

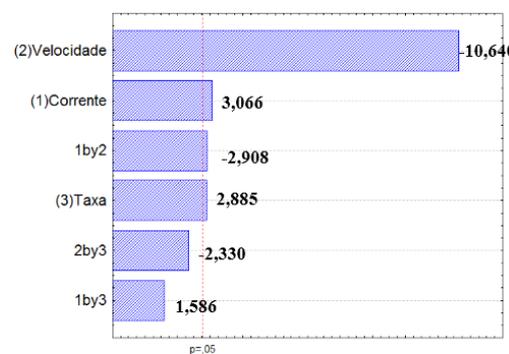
A norma N – 1707 da Petrobras indica que o valor ótimo de um reforço é de no mínimo 3 mm, onde ressaltam também a importância de se obter durante o processo de soldagem um

reforço próximo de 5 mm e posteriormente faz-se algum procedimento de usinagem para deixar o mais próximo de 3 mm. Contudo, conclui-se que os valores obtidos durante todos os experimentos, estão atendendo a norma citada.

3.2 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES NA LARGURA

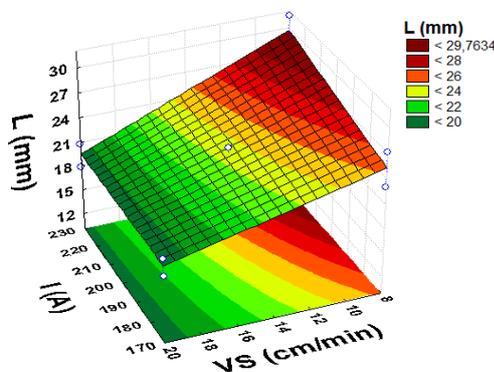
De acordo com a Tabela 5, pode-se verificar que os valores de largura variaram entre 17,859 mm e 31,482 mm durante os experimentos. Na Figura 10 pode-se ver que a taxa de deposição, corrente, velocidade de soldagem e a interação entre as duas últimas tiveram valores estatisticamente significativos enquanto as interações de velocidade e taxa de deposição se mostraram com valores estatisticamente não significativos. Com isso, foi gerado a superfície de resposta para a variável largura (Figura 11) com taxa fixa em 30 g/ min. Entretanto, com o gráfico de Pareto, foi constatado que a corrente, taxa e a interação entre as duas tem sinal positivo e são diretamente proporcionais a variável de saída. E a velocidade de deposição, interação entre corrente e velocidade e a interação entre velocidade e taxa são inversamente proporcionais a largura, ou seja, quando esses fatores são aumentados a largura diminui.

Figura 10- Gráfico de Pareto para a Largura.



Fonte: Autor.

Figura 11- Superfície de resposta para largura



Fonte: Autor.

A partir da superfície de resposta Figura 11, foi obtido um modelo de primeira ordem Equação 3 que relaciona as variáveis dependentes e independentes.

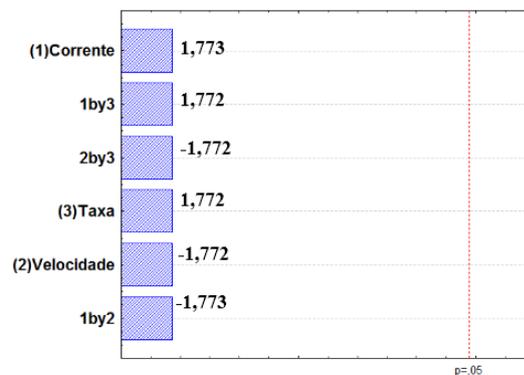
$$L=13,140+0,004*V_s+1,433*I-0,006*V_s*I+0,004*30*V_s-0,029*30*I-5,103 \quad \text{Eq.3}$$

Nos resultados acima, nota-se bons valores de largura, considerando que o processo de deposição se torna mais economicamente viável com um número menor de passes de cordão de solda. Diaz (2010), fez um comparativo entre a largura obtida com o processo PTA e o obtido com o processo MIG, onde constatou maiores valores para as aplicações com PTA.

3.3 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES NA PENETRAÇÃO

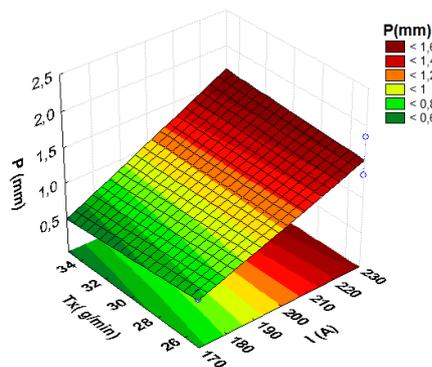
Com base na Tabela 5, pode-se observar que os valores de penetração, gerados a partir das combinações das variáveis de entrada, variaram entre 0,36 mm e 1,94mm. Diante da Figura 12, conclui-se que nenhuma das variáveis de entrada e também as interações entre elas não foram estatisticamente significativas, mas o valor positivo para a corrente, taxa de deposição e a interação entre elas indicam que se essas variáveis aumentam de valor, a penetração também aumenta. Desta forma, fazendo-se uma comparação experimento por experimento, como por exemplo os experimentos 1 e 2, que os valores de penetração foi 0,78mm para o primeiro e 1,32mm para o segundo, conclui-se então que a corrente e a taxa de deposição têm influencia. Os experimentos 3 e 4, 5 e 6 e por fim 7 e 8, e também apresentam o mesmo comportamento.

Figura 12- Gráfico de Pareto para a Penetração.



Fonte: Autor.

Figura 13- Superfície de resposta para a Penetração.



Fonte: Autor.

A partir da superfície de resposta (Figura 13), foi obtido um modelo de primeira ordem Equação 4 que relaciona as variáveis dependentes e independentes.

$$P=1955,21-206,98*I-1552,38*T_x-12,935*14*I+15,523*I*T_x-77,61*14*T_x+63383,22 \quad \text{Eq.4}$$

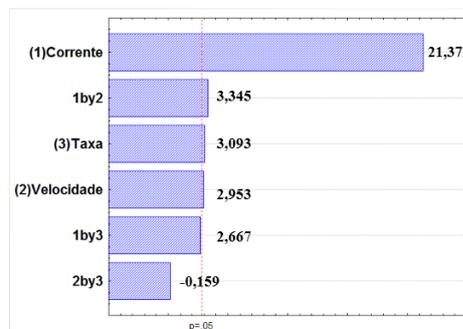
Nunes et al (2015), afirma que a maior penetração conduz para um maior percentual de diluição quando a corrente do arco transferido aumenta. E para níveis de corrente mais baixos, a geração de calor é menor e a maior parte do calor é utilizado para fundir o pó e a menor parcela é disponibilizado para fundir o substrato depois da fusão do pó. Além disso, a força do arco é menor para esta condição, proporcionando uma redução da profundidade.

3.4 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES NA DILUIÇÃO

Na Tabela 5, pode-se verificar que os valores de diluição variaram entre 4,341% e 20,54% durante os experimentos. Com os resultados de diluição da Tabela 5 e a partir da análise do gráfico de Pareto (Figura 14), percebe-se que o aumento da corrente de 170A para 230A, provoca um aumento estatisticamente significativo na diluição, como pode-se ver durante a comparação dos experimentos 1 e 2, 3 e 4, 5 e 6, e 7 e 8. Esse aumento da diluição, diminui as propriedades anticorrosivas, pois, aumenta o teor de ferro no revestimento.

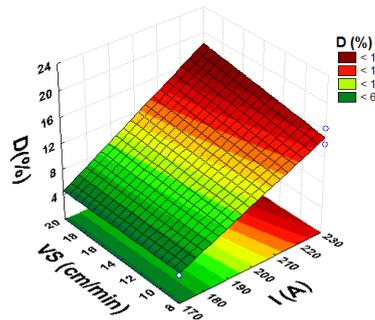
Com isso, pôde-se gerar a superfície de resposta, conforme apresentada na (Figura 15), com uma taxa de deposição fixa em 30g/min. Contudo, conclui-se que a melhor combinação foi a do experimento 1 com corrente de 170 A, velocidade de soldagem de 8 cm/min e taxa de deposição de 25g/min, e o pior caso foi o experimento 8 com corrente de 230 A, velocidade de soldagem de 20 cm/min e taxa de deposição de 35 g/min.

Figura 14- Gráfico de Pareto para a diluição.



Fonte: Autor.

Figura 15- Superfície de resposta para a Diluição.



Fonte: Autor.

A partir da superfície de resposta Figura 15, foi obtido um modelo de primeira ordem Equação 2 que relaciona as variáveis dependentes e independentes.

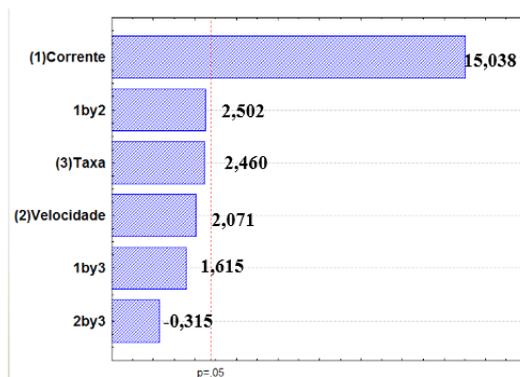
$$D\% = 7,453 - 0,023 * I - 0,854 * V_s + 0,005 * I * V_s + 0,005 * 30 * I - 0,001 * 30 * V_s - 23,932 \quad \text{Eq.5}$$

Segundo Bond; Becker e D'oliveira (2011), a diluição obtida em peças soldadas com o processo PTA, devem indicar valores entre 6% e 10% com isso afirma-se que o processo PTA realmente é o mais indicado quando se quer obter valores baixos de diluição e de acordo com os resultados obtidos, o experimento 1, obteve o melhor resultado de aproximadamente 4,341%.

3.5 EFEITOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES SOBRE O TEOR DE FERRO

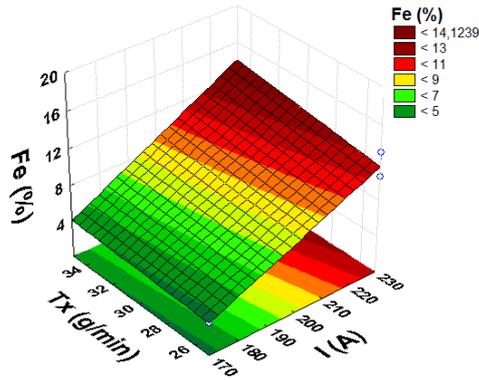
Com os valores da Tabela 5, pode-se observar que o teor de ferro variou entre 3,64% para o experimento 1 e 15,84% para o experimento 8. O experimento 1 obteve também a menor diluição e o experimento 8 maior diluição. A partir da Figura 16, percebeu-se que a corrente é a variável estatisticamente mais significativa e que com o aumento da corrente, velocidade, taxa e a interação entre as duas primeiras, aumenta-se também o teor de ferro. Com isso, foi gerado a superfície de resposta (Figura 17), com a velocidade de soldagem fixa em 14 cm/min.

Figura 16- Gráfico de Pareto para o teor de Ferro.



Fonte: Autor.

Figura 17- Superfície de resposta para o teor de Ferro.



Fonte: Autor.

A partir da superfície de resposta Figura 17, foi obtido um modelo de primeira ordem Equação 6 que relaciona as variáveis dependentes e independentes.

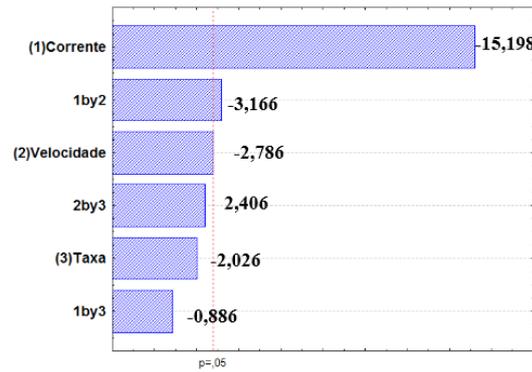
$$\text{Fe}\% = 2,107 - 0,005 * I - 0,457 * T_x + 0,004 * I^2 + 0,003 * I * T_x - 0,003 * I^2 * T_x - 8,956 \quad \text{Eq.6}$$

Resultados semelhantes foram reportados por Santos et al (2015) que também obteve em seus experimentos baixos teores de ferro para baixa diluição e altos valores de teor de ferro para elevados valores de diluição.

3.6 EFEITOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO

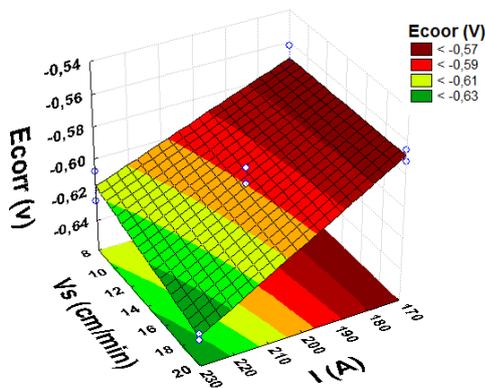
Os resultados apresentados na Tabela 5 para os valores do Potencial de corrosão, E_{corr} , variaram de $-0,643 \text{ V}$ a $-0,562 \text{ V}$ para os experimentos 1 e 8 respectivamente. O gráfico de areto (Figura 18) mostra que a corrente e a interação entre a corrente e velocidade são estatisticamente significativas, embora seus valores sejam negativos, indicando que, quando essas variáveis aumentam, o potencial de corrosão diminui. Isso fica mais evidente na superfície de resposta (Figura 19), com a taxa de alimentação fixa em 30 g/min , corrente variando de 170 A a 230 A e a velocidade de soldagem variando de 8 cm/min a 20 cm/min .

Figura 18- Gráfico de Pareto para o Potencial de corrosão Ecorr.



Fonte: Autor.

Figura 19- Superfície de resposta para o Potencial de corrosão.



Fonte: Autor.

A partir da superfície de resposta Figura 19, foi obtido um modelo de primeira ordem Equação 7 que relaciona as variáveis dependentes e independentes.

$$E_{corr} = -0,463 - 0,0002 * I + 0,001 * V_s - 0,00004 * I * V_s - 0,00002 * 30 * I + 0,0002 * 30 * V_s - 0,0205 \quad \text{Eq.7}$$

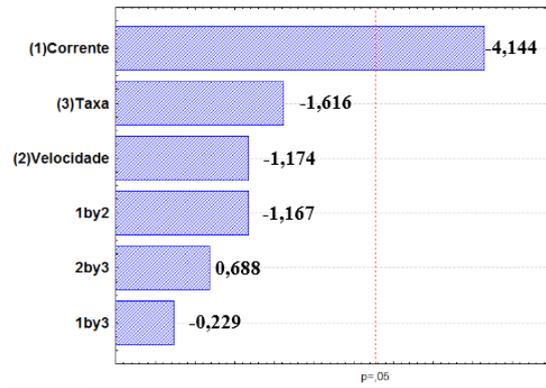
Santos (2015), a partir de estudos realizados com o mesmo processo de soldagem PTA e mesmo material de adição, obteve valores de potencial de corrosão similares, e pode-se concluir que os valores obtidos estão coerentes com a literatura.

3.7 EFEITOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES SOBRE A RESISTÊNCIA À POLARIZAÇÃO

Observa-se pelos resultados apresentados na Tabela 5 que os valores da Resistência à polarização (R_p) variaram de 215,44,23 K Ω a 486,95 K Ω , para os experimentos 1 e 7 respectivamente.

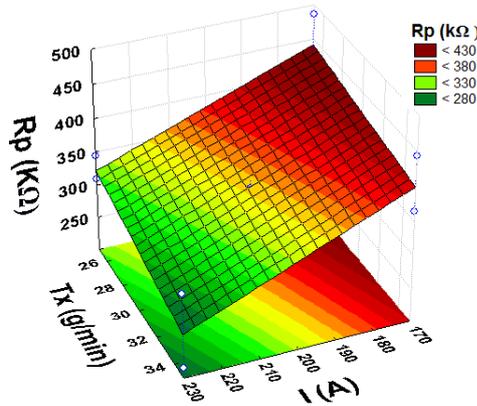
Através do diagrama de Pareto da (Figura 20), observa-se que apenas a corrente, apresentou influência significativa na variável de resposta resistência à polarização, o sinal negativo nos valores do gráfico indica que a maior resistência à polarização é atingida para menores valores das variáveis, exceto a interação entre a velocidade e taxa que possui valor positivo. Diante das informações apresentadas, foi construída a superfície de resposta (Figura 21), mantendo-se a velocidade de alimentação de 14cm/min, variando os valores da corrente no intervalo de 170 V a 230 V e a Taxa de deposição variando no intervalo de 25 g/min a 30 g/min.

Figura 20- Gráfico de Pareto para a Resistência à Polarização.



Fonte: Autor.

Figura 21- Superfície de resposta para a Resistência à Polarização.



Fonte: Autor.

A partir da superfície de resposta (Figura 21), foi obtido um modelo de primeira ordem Equação 8 que relaciona as variáveis dependentes e independentes.

$$R_p = 700,805 - 0,022 \cdot I - 5,219 \cdot T_x - 0,099 \cdot 14 \cdot I - 0,023 \cdot I \cdot T_x + 0,353 \cdot 14 \cdot T_x + 89,579 \quad .8$$

A Figura 22, indica que os melhores valores de propriedades anticorrosivas são atingidos para os menores valores de corrente e taxa de deposição, sendo coerentes com os

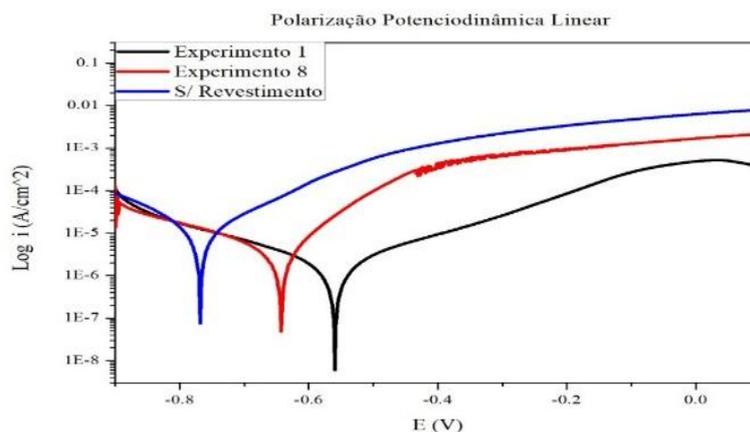
valores de diluição e teor de ferro. Desta forma, conclui-se que quanto maior o valor de resistência a polarização, maior será suas propriedades anticorrosivas.

3.8 EFEITOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES SOBRE A RESISTÊNCIA À CORROSÃO

A avaliação da resistência à corrosão dos revestimentos foi realizada através da técnica de polarização potenciodinâmica linear (PPL). A Figura 22 apresenta as curvas de polarização potenciodinâmica dos experimentos 1, 8 e do aço API 5L X 70 sem revestimento, as duas primeiras amostras apresentaram a menor e a maior diluição, 4,341% e 20,54%, dentre os 11 experimentos realizados.

Como pode-se analisar na Tabela 5, o experimento 1 com menor diluição 4,341% e teor de ferro 3,640%, obteve também um potencial maior -0,562 V e isso indica uma maior resistência a corrosão e no experimento 8 com maior diluição 20,54% e teor de ferro 15,840%, obteve-se um potencial menor -0,643 V indicando uma menor resistência a corrosão e o aço sem o revestimento apresentou um comportamento coerente com um valor de aproximadamente -0,800 V. Assis et al (2017), obteve resultados semelhantes e afirma que quanto mais positivo for o valor do potencial, mais será retardado o início da corrosão.

Figura 22- Curva de polarização dos experimentos 1 ,8 e substrato sem revestimento.



Fonte: Autor

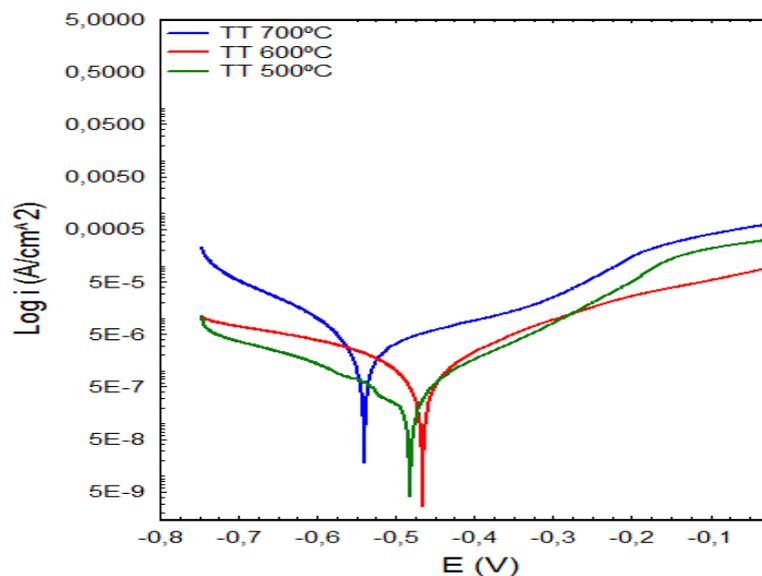
3.9 EFEITOS DO TRATAMENTO TÉRMICO NA AMOSTRA DE MENOR DILUIÇÃO

Foi feito o tratamento térmico na amostra de menor diluição 4,341% experimento 1 e com potencial de corrosão de -0,562 V. A amostra foi submetida a temperaturas de 500°C, 600°C e 700°C respectivamente. Com isso, pôde-se observar através da (Figura 23), que

ocorreu um aumento na resistência à corrosão crescente do tratamento de 700°C com -0,545V, 500°C com -0,485 V e 600°C com -0,470 V.

Esses resultados estão relacionados com a formação de precipitados formados na liga inconel, após a aplicação do tratamento térmico de alívio de tensões. Resultados semelhantes foram obtidos por Suave et al (2017), que observaram um aumento na resistência mecânica e de corrosão, devido à precipitação da fase γ da liga de níquel no espaço interdendrítico para faixa de temperaturas entre 550-750°C.

Figura 23- Curva de polarização dos tratamentos térmicos aplicados a amostra de menor diluição



Fonte: Autor.

4 CONCLUSÕES

O PTA se mostrou uma boa opção para deposição de revestimentos em projetos que necessitam de um baixo valor de diluição.

O melhor valor encontrado foi o do experimento 1, com diluição de 4,341%, teor de ferro de 3,64% e potencial de -0,562.

O pior valor encontrado dentre os 11 experimentos foi o do experimento 8, com diluição de 20,54%, teor de ferro de 15,84% e potencial de -0,643.

Os melhores parâmetros encontrados foram, corrente 170 A, velocidade de soldagem de 8 cm/min e taxa de alimentação 25 g/min.

Os piores, corrente de 230 A, velocidade de soldagem de 20 cm/min e taxa de deposição de 30 g/min.

O tratamento térmico revelou um aumento da resistência a corrosão para ambas as temperaturas e a de -0,400 V.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, F. S.N; DIAS, M.C.C; SANTOS, A.S; MOURA, T.M.; ANTONIO, M.S.; SANTANA, R.A.C. **Análise da Resistência a Corrosão de Revestimentos à base da Liga de Níquel depositados por soldagem em aço API 5L Gr B.** Campina Grande- PB, 2017.
- BOND, Danielle; BECKER, Sueli Fischer and D'OLIVEIRA, Ana Sofia C.M. **Influência da corrente e granulometria do material de adição nos revestimentos processados por PTA.** Curitiba- PR, 2011.
- BUSSO, Nicolangelo Del; MONTEIRO, Waldemar Alfredo. **Caracterização microestrutural e mecânica de aço API-5L-X70 após soldagem pelo método de arco submerso.** Rio de Janeiro- RJ, 2015.
- CORTIAL F.; CORRIEU J.M.; VERNOT-LOIER C. **Heat treatments of weld alloy 625: Influence on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance.** La Montagne, 1994.
- DIAZ, Víctor Vergara; DUTRA, Jair Carlos e D'OLIVEIRA, Ana Sofia Clímaco Monteiro. **Deposição por plasma com arco transferido.** Curitiba- PR, 2010.
- DÍAZ, Victor; DUTRA Jair e D'OLIVEIRA, Ana Sófia C.M. **Deposição por Plasma com Arco Transferido.** Vitória- ES, 2014.
- GENTIL, Vicente. **Corrosão.** 5 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- MELO, Raphael; BATISTA, Valmir; SILVA, M.M.; MACIEL, Theophilo e DOS SANTOS, Marco. **Influência dos Parâmetros de Soldagem sobre as Características de Revestimentos de Aço Inoxidável Aplicados Em Aço C-Mn pelo Processo FCAW.** Belo Horizonte – MG, 2011.
- NUNES, E. B.; CAVALCANTE, N. E.; BARRETO, A. S.; SILVA, A. Í. N.; e MOTTA M. F. **Avaliação do Efeito da Energia de Soldagem na Deposição de Aço Inoxidável Super duplex pelo Processo Plasma Pó.** Fortaleza- CE, 2015.
- PETROBRAS, **Plano de Negócios e Gestão 2019-2023.** Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/estrategiacorporativa/plano-de-negocios.2018.>>. Acesso em: 10 de novembro de 2018.
- SANDES, Soraia Simões. **Avaliação de Revestimentos de Liga de Níquel 625 Depositados pelo Processo de Eletroescória.** São Paulo-SP, 2016.

SANTOS, A. C. Avaliação da Resistência à Corrosão de Revestimentos da Liga UNS NO6625 Depositados Pelo Processo PTA-P. Vitória- ES: Tese de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2015.

SANTOS, Aureliano; MOURA, Theophilo; SANTANA, Renato. Avaliação de revestimentos à base de Inconel 625 depositados através do processo de soldagem GMAW em aço API 5L X70 utilizando Planejamento Fatorial. Campina Grande- PB; 2015.

SHEN, R. R., ZHOU, Z., LIU, P., & CHAI, G. Effects of PWHT on the microstructure and mechanical properties of ERNiCrFe-7 all-weld metal. Stockolm, 2014.

SUAVE LM; CORNIER J; VILLECHAISE P; SOULA A; HERVIER Z; BERTHEAUD D; et al. Microstructural evolutions during thermal aging of alloy 625: impact of temperature and forming process. Metallurgical and Materials Transactions. Ljubljana, 2017.

VIDAL F.A. ANÁLISE COMPOSICIONAL EM REVESTIMENTOS DE INCONEL 625 DEPOSITADOS POR PTA-P EM AÇO ASTM A36. Vitória- ES, 2014.