

# INFLUÊNCIA DA CORRENTE E TAXA DE ALIMENTAÇÃO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE REVESTIMENTOS À BASE DA LIGA INCONEL 625 DEPOSITADA POR PTA-P

<sup>1</sup>BRENO LUIZ SANTOS SOARES

<sup>2</sup>Aureliano Xavier dos Santos

## RESUMO

Atualmente, o processo de exploração do petróleo ainda é muito prejudicado por falhas que ocorrem nas tubulações, nas quais atrasam o cronograma operacional de produção, gerando altos custos de manutenção, além de gerar riscos ao meio-ambiente e a saúde. Com isso, a busca por alternativas menos onerosas para minimizar esses impactos é constante, principalmente contra falhas devido à 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 da corrente de soldagem e taxa de alimentação sobre a resistência à corrosão de revestimentos à base da liga Inconel 625, depositados pelo processo PTA-P 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 à plasma com arco transferido (PTA-P), seguindo de análise da diluição (D), teor de ferro (Fe) e resistência à corrosão por medidas eletroquímicas. Os revestimentos obtidos com menores valores de corrente de soldagem e taxa de alimentação apresentaram melhores propriedades anticorrosivas.

**Palavras-chave:** Aços ARBL. PTA-P. Revestimento. Inconel 625. Corrosão – metal.

## ABSTRACT

Nowadays, the oil exploration process is still greatly affected by pipeline failures, which delay the production schedule, creates high maintenance costs, and creates risks to the environment and health. Thus, the search for less costly alternatives to minimize these impacts is constant, especially against failures due to 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 the welding current and feed rate on the corrosion resistance of coatings based on the Inconel 625 alloy, deposited by PTA-P 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 PTA-P welding process, followed by an analysis of the dilution, iron content and corrosion resistance by electrochemical measurements. The coatings obtained with lower welding current and feed rate values showed better anti-corrosion properties.

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

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

<sup>2</sup>Orientador 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

No setor de petróleo e gás, as tubulações são de suma importância no transporte e distribuição desses insumos, contudo essas tubulações estão sujeitas à ambientes de condições extremas e podem vir a falhar, então pessoas e empresas estão adotando e desenvolvendo medidas corretivas para reduzir os impactos dessas falhas. A aplicação de revestimentos com alta resistência à corrosão com intuito de aumentar a vida útil de equipamentos do setor de petróleo e gás é uma das medidas que está sendo utilizada (LUCHTENBER et al., 2019).

Dentre os aços utilizados nas indústrias do petróleo e gás, os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) são considerados os mais utilizados para fabricação de tubulações para transporte de petróleo. Os aços conforme a especificação API 5L X70 segundo o API (*American Petroleum Institute*) são os mais usados para produção de tubulações por apresentarem propriedades como alta resistência mecânica, boa tenacidade, ductilidade e soldabilidade (API, 2007). Contudo, esses aços são susceptíveis ao fenômeno da corrosão. Por isso, o tipo de produto a ser transportado é um fator muito determinante na avaliação desse fenômeno, especialmente em juntas soldadas, onde defeitos podem surgir por causa da fadiga em pontos de alta concentração de tensão (GIORGETTI et al., 2019).

A corrosão é uma das principais causas de falhas em equipamentos e tubulações de plataformas de produção. O fenômeno de corrosão pode ser definido como o ataque destrutivo e não intencional de um metal, sendo este ataque de natureza eletroquímica e tem início na superfície do metal (CALLISTER, 2016). Essas falhas prejudicam o processo de exploração do petróleo, no qual atrasam o cronograma operacional de produção, gerando altos custos de manutenção, além de gerar riscos ao meio-ambiente e a saúde. Com isso, uma das alternativas para minimizar essas falhas é a aplicação de camadas protetoras na superfície dos aços utilizados na indústria do petróleo e gás por soldagem (LUCHTENBER et al., 2019).

De acordo com a literatura, vários processos de soldagem podem ser empregados em soldagem de revestimento como: MIG/MAG, Arco submerso e PTA-P. O processo de soldagem à plasma com arco transferido com alimentação em pó (PTA-P), vem sendo bastante utilizado para deposição de camadas resistentes ao desgaste e corrosão em superfícies de materiais metálicos (SILVA et al., 2012).

Este processo possui como princípio básico de funcionamento um arco de plasma que promove a coalescência de metais pelo aquecimento gerado a partir de um arco constrito. O processo incorpora três sistemas de gás, sendo o primeiro chamado de gás de plasma, normalmente utiliza-se argônio, o segundo gás é chamado de proteção, onde utiliza-se argônio ou misturas

com hidrogênio e o terceiro sistema de escoamento de gás, chamado de gás de transporte ou gás de arraste, é utilizado para carregar o material consumível durante a aplicação do revestimento e o gás utilizado nesta parte do sistema é o argônio ou misturas com hidrogênio (REIS, 2007).

O PTA-P apresenta como vantagens em relação aos demais processos de soldagem: baixa taxa de diluição, que é o percentual do metal de base que se dissolve junto ao metal de adição formando a composição química do metal de solda, pequena zona afetada pelo calor e alta taxa de deposição. Essas vantagens advêm essencialmente do controle dos parâmetros de soldagem que o processo possui, os principais são: vazão do gás de plasma, corrente de soldagem, velocidade de soldagem e taxa de alimentação, os parâmetros citados possuem influência direta nas características geométricas da peça a ser soldada (largura, penetração), na diluição e no revestimento (SILVA et al., 2012). Então por apresentar as vantagens apresentadas, além de uma ampla variedade de seleção de materiais, isto é, aços, ligas à base de cobalto e níquel e compósitos com matriz metálica o PTA-P é um processo para fácil obtenção de revestimentos (SINGH et al., 2015).

Para que os revestimentos depositados alcancem as características desejadas, um rigoroso ajuste dos parâmetros de soldagem deve ser realizado. Dentre os parâmetros de processo na soldagem por PTA podemos destacar a corrente de soldagem e a taxa de alimentação, de uma forma geral quanto maior a corrente maior será a penetração e a largura do cordão de solda, este fato está atrelado ao aumento do aporte térmico, ou seja, a energia gerada durante o processo de soldagem, entretanto com o aumento da taxa de alimentação menor será a penetração e a diluição do metal de adição no metal base, neste caso a energia gerada estará promovendo a fusão do metal de adição, podendo até surgir descontinuidades no revestimento, caso ocorra a elevação da taxa de alimentação (REIS, 2007; DEUIS et al., 1998; DÍAZ et al., 2010).

Em geral, estes revestimentos podem ser de aços inoxidáveis austeníticos ou ligas de níquel (Ni). Inconel é uma liga à base de níquel usada em ambientes extremos devido a sua alta resistência e estabilidade em condições de extremas temperaturas. A Inconel 625 é particularmente útil em várias aplicações na indústria aeroespacial, marítima e em turbinas a gás devido à sua alta processabilidade (WALSH et al., 2009; SEXTON, et al., 2002). Também mostra excelentes propriedades anticorrosivas e é, portanto, um material muito promissor para a proteção de materiais mais baratos. A camada de óxido passivante que se forma na superfície da liga Inconel 625 é uma estrutura em camadas, isto é, a camada interna é composta por um óxido de cromo-níquel e a camada externa composta por um óxido de molibdênio-cromo (LLOYD et al., 2004).

Existem estudos que descrevem o comportamento da resistência à corrosão de revestimentos Inconel 625, que geralmente são estudados usando análises de polarização potenciodinâmica da superfície revestida (LIU et al., 2007; SUUTALA et al., 2006). A resistência à ambientes corrosivos é atribuída a certos elementos de liga que constituem a matriz da liga. Para que os revestimentos de liga de níquel tenham bom desempenho sob a corrosão, os mesmos devem ter o menor teor de ferro (Fe) possível, o qual está intrinsecamente ligado ao nível de diluição do substrato no revestimento, ou seja, quanto menor a diluição, menor a probabilidade de formação de microestruturas frágeis e susceptíveis à corrosão (SILVA et al., 2010).

A corrosão que ocorre nesses revestimentos pode ser analisada com o auxílio de técnicas eletroquímicas para avaliação da resistência à corrosão como Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) e Polarização Potenciodinâmica Linear (PPL) (LIU et al., 2007). A EIE é utilizada para estudar o comportamento eletroquímico de materiais e interfaces e possui um princípio de funcionamento baseado na perturbação do estado de um determinado sistema (HA-ERI et al., 2010). A PPL avalia a variação do potencial de equilíbrio estabelecido por um metal devido a reações que ocorrem em sua superfície, a diferença entre o potencial obtido após a polarização e o potencial de equilíbrio, é designada como sobretensão (SANTOS, 2014).

No PTA-P, para alcançar boas características do revestimento depositado, como por exemplo largura, reforço e penetração, é muito importante selecionar a combinação certa dos parâmetros do processo de soldagem. No entanto, isso requer muitos experimentos e a otimização experimental termina ficando muito onerosa e lenta. Portanto, torna-se necessário utilizar ferramentas convenientes para a otimização do processo (VASUDEVAN et al., 2007), como por exemplo o planejamento fatorial experimental que é uma ferramenta que permite avaliar simultaneamente o efeito de um grande número de variáveis, a partir de um número reduzido de ensaios experimentais, quando comparados aos processos univariados (PERALTA-ZAMORA et al., 2005).

O objetivo desse trabalho é avaliar o efeito da corrente de soldagem e da taxa de alimentação sobre a resistência à corrosão de revestimentos à base da liga Inconel 625 depositados pelo processo de soldagem PTA-P em aços API 5L X70.

## **2 METODOLOGIA**

O material utilizado neste trabalho como metal base foi o aço ARBL API 5L X70 com 19 mm de espessura na forma de chapa plana, tendo sua composição química apresentada na Tabela 1. Para obtenção dos corpos de prova a chapa foi cortada pelo processo “oxicorte”.

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

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0,19	0,24	0,7	0,018	0,018	0,064	0,008	0,07

Fonte: USIMINAS, 2011

A otimização dos parâmetros do processo: corrente de soldagem (I) e taxa de alimentação do pó (Tx) em estudo, foi estabelecido através de um planejamento experimental fatorial em dois níveis com três repetições no ponto central, conforme os dados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Níveis reais e codificados dos fatores em estudo: corrente (I) e taxa de alimentação do pó (Tx).

Parâmetros	Unidades	Notação	Níveis		
			-1	0	+1
Corrente	A	I	170	200	230
Tx. de alimentação	g/min	Tx	25	30	35

Fonte: Autor.

Seguindo as regras do planejamento fatorial, a sequência das quatro combinações possíveis das variáveis de entrada mais o ponto central realizado três vezes, resulta em sete experimentos ( $2^2 + 3$ ) realizados em uma ordem aleatória (OA). A sequência aleatória dos experimentos permite a aplicação de testes estatísticos de significância, a construção de intervalos de confiança e determinação da significância dos efeitos (NEVES et al., 2002). A Tabela 3 apresenta a matriz de planejamento completa do estudo.

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

Experimentos	1	2	3	4	5	6	7
I (A)	170	230	170	230	200	200	200
Tx (g/min)	25	25	35	35	30	30	30

Fonte: Autor.

Foi utilizado a fonte de soldagem da linha DIGI Plus A7 fabricada pela IMC Soldagem conforme a Figura 1, que permite operar em diversas modalidades de soldagem além de possuir uma capacidade de corrente máxima de 800 A. Durante a soldagem foi utilizado o gás argônio puro para os três fluxos de gases (gás de proteção, gás de plasma e gás de arraste).



Figura 1 – Equipamento de soldagem PTA.

Fonte: SANTOS, 2014.

Como metal de adição para o processo de soldagem por plasma com arco transferido, PTA-P, foi utilizada a liga de níquel (Ni) Inconel 625 (AWS ER NiCrMo-3) na forma de pó atomizado, que apresenta o pó na faixa granulométrica entre 60 a 63  $\mu\text{m}$ , cuja composição química está apresentada na Tabela 4.

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

%	C	Mn	Si	Cr	Co	Mo	Fe	Al	Ti	Ni
<b>Mínimo</b>	-	-	-	20,00	-	8,00	-	-	-	58,00
<b>Máximo</b>	0,1	0,5	0,5	23,00	1,00	10,00	5,00	0,40	0,40	-

Fonte: Alloy Wire Internacional.

Para deposição das camadas de revestimentos alguns parâmetros do processo de soldagem foram mantidos constantes, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros fixos utilizados no processo.

<b>Outros Parâmetros</b>	
<b>Recuo do Eletrodo</b>	1 mm
<b>Diâmetro do Bico Constritor</b>	3,10 mm
<b>Polaridade</b>	Reserva (CC-)
<b>Vazão do Gás de Proteção</b>	10 L/min
<b>Vazão do Gás de Plasma</b>	2,2 L/min
<b>Vazão do Gás de Arraste</b>	3 L/min
<b>Velocidade de Soldagem</b>	8 cm/min
<b>DBP</b>	20 mm
<b>Ângulo de Ataque</b>	90°

Fonte: Autor.

A deposição foi feita com três camadas de revestimentos utilizando uma sobreposição de  $\frac{1}{2}$  de um tamanho inicial (L), ou seja, a segunda camada teve início em  $\frac{L}{2}$  e em seguida a terceira camada tendo início em  $\frac{3L}{4}$ , utilizando uma temperatura de interpasse de  $100^{\circ}\text{C}$ , como é ilustrado na figura 2.

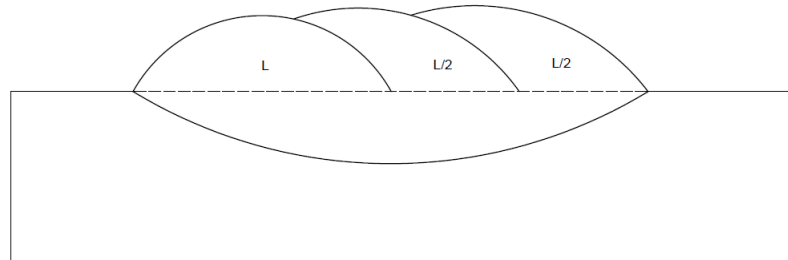


Figura 2 - Esquema do sequenciamento de passes.

Fonte: Autor.

Para a confecção dos corpos de prova, foi utilizada uma cortadeira metalográfica Fortel CF III, conforme ilustrado na Figura 3A. Após o corte das amostras, foi feito o embutimento a frio, utilizando resina poliéster. 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 3B. 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 3 – (A) Cortadeira utilizada no corte dos corpos de prova. (B) Lixadeira e Politriz.

Fonte: Autor.

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

As amostras foram submetidas à análise de resistência à corrosão e foram obtidas as seguintes medidas eletroquímicas de corrosão: potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), resistência à polarização ( $R_p$ ) e corrente de corrosão ( $I_{corr}$ ) através da técnica de polarização potenciodinâmica linear e espectroscopia de impedância eletroquímica. O equipamento utilizado foi o potenciostato/galvanostato PG STATE302N da Autolab, conforme ilustrado na Figura 4. 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 4 - Potenciostato/Galvanostato PG STATE30 da Autolab.

Fonte: SANTOS, 2014.

A avaliação foi realizada utilizando uma célula eletroquímica no interior de uma gaiola de Faraday, à temperatura ambiente, conforme apresentado no esquema da Figura 5. 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.

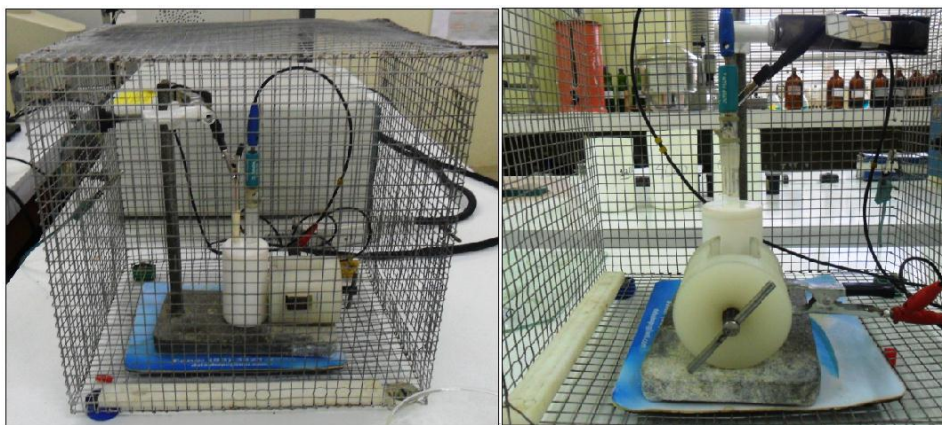


Figura 5 - Célula eletroquímica e Gaiola de Faraday para análise de corrosão.

Fonte: SANTOS, 2014.



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 6 apresenta a matriz de planejamento fatorial  $2^2$  mais três pontos centrais e os resultados experimentais das deposições por soldagem, com relação as variáveis dependentes: diluição (D%), teor de ferro (Fe%),  $E_{corr}$ ,  $R_p$  e  $I_{corr}$ , variando-se as variáveis independentes: corrente de soldagem (I) e taxa de alimentação (Tx).

Tabela 6 - Matriz de planejamento fatorial  $2^2$  e resultados obtidos por PTA-P.

<b>Parâmetros/ Experimentos</b>	<b>I (A)</b>	<b>Tx (g/min)</b>	<b>D (%)</b>	<b>Fe (%)</b>	<b><math>R_p</math> (K<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>E_{corr}</math> (V)</b>	<b><math>I_{corr}</math> (A)</b>
1	170	25	4,33	3,64	486,95	-0,562	5,70
2	230	25	13,82	10,62	344,30	-0,608	18,05
3	170	35	5,59	4,73	364,91	-0,578	7,31
4	230	35	16,20	12,88	324,58	-0,641	21,17
5	200	30	10,20	7,97	346,99	-0,601	13,32
6	200	30	10,25	8,27	344,30	-0,606	13,39
7	200	30	10,17	6,94	338,99	-0,591	13,28

Fonte: Autor.

De acordo com os resultados obtidos com o método experimental de planejamento fatorial, foram geradas Equações (1, 2, 3, 4 e 5), 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 (I e Tx).

#### **Influência das variáveis em relação à diluição:**

Com base na Figura 6A, verifica-se que a corrente de soldagem (I) e a taxa de alimentação (Tx), mostraram influência estatisticamente significativa, enquanto que a interação entre as variáveis  $I \cdot Tx$ , não apresentou a mesma influência. Os valores positivos nas colunas da corrente de soldagem indicam que à medida que ocorre o aumento dessas variáveis, o aumento da diluição é favorecido. Como afirmam D'OLIVEIRA et al., (2002) o processo PTA-P produz valores de diluição de aproximadamente 5 a 10 %, então os resultados obtidos nos experimentos 1, 3, 5, 6 e 7 demonstram que com as devidas variações nos parâmetros do processo de soldagem, o mesmo se apresenta adequado e pode ser utilizado para aplicação de revestimentos.

Segundo SILVA et al., (2012) devido ao aporte térmico fornecido no processo de soldagem, correntes muito baixas acarretam em falta de fusão nas laterais do cordão, mas por outro lado, correntes altas causam excesso de diluição, isso se deve ao aumento da energia de soldagem, que proporciona um aumento na área fundida sobre a poça de fusão.

Resultado também observado por BHARATH et al., (2008), que utilizaram o processo de soldagem PTA-P com uma liga à base de cromo e tungstênio para fazer revestimentos em aço (X45CrSi93), onde foi verificado o aumento dos níveis de diluição com o aumento da corrente de soldagem e ainda segundo o autor para que um revestimento seja eficaz, os níveis de diluição precisam ser mantidos os mais baixos possíveis.

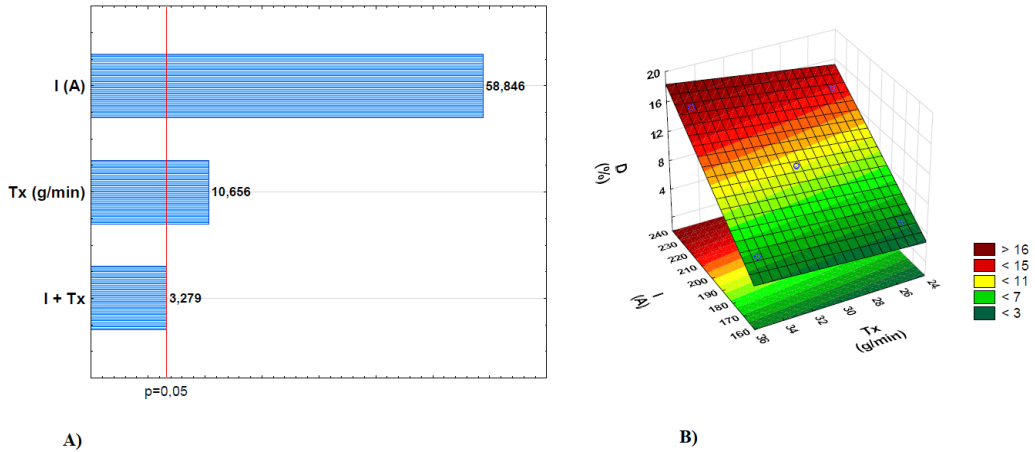


Figura 6 - (A) Gráfico de Pareto para os efeitos das variáveis independentes sobre a diluição (D) [%]. (B) Superfície de resposta da diluição *versus* corrente de soldagem *versus* taxa de alimentação.  $R^2 = 99,91\%$ .

Fonte: Autor.

Com relação à taxa de alimentação, os resultados da superfície de resposta (Figura 7B), apresentam que à medida que se aumenta a taxa de alimentação a diluição também tende a aumentar. De acordo com MARCONI e MARCONI (2005) quanto maior a taxa de alimentação de pó, maior corrente do arco principal requerida e maior a diluição. Porém DÍAZ (2005) e DEUIS et al., (1998) observaram o efeito contrário, ou seja, uma maior taxa de alimentação de pó resulta em uma menor diluição, isso se deve ao fato de que uma maior quantidade de pó tende a retirar mais calor da poça que é fornecido pelo processo de soldagem.

Os dados da Tabela 7, mostram que o modelo apresentado na Equação 1 tem coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 99,91% das variações obtidas e com um valor da razão de  $F_{\text{calculado}}$  por  $F_{\text{tabelado}}$  igual a 127,7, indicando que o modelo é estatisticamente significativo com 95% de confiança pode ser útil para fins preditivos.

$$D_{(I, Tx)} = -17,68 + 0,111 \cdot I - 0,191 \cdot Tx + 0,001 \cdot I \cdot Tx; \quad (1)$$

Tabela 7 - Análise de variância para avaliação da diluição.

Fator	SQ	GL	MQ	F <sub>calculado</sub>
Regressão	104,663	3	34,887	1185,83
Resíduo	0,0883	3	0,0294	
F. Ajuste	0,085	-	-	
Erro Puro	0,0033	-	-	
Total	104,751	6		
R <sup>2</sup>	99,91%			
F <sub>tabelado</sub>	9,28		F <sub>calc</sub> /F <sub>tab</sub>	= 127,7

Fonte: Autor.

### Influência das variáveis em relação ao teor de ferro:

De acordo com a Tabela 6, os valores de teor de ferro variaram de 3,64 % a 12,88 %. Analisando os resultados obtidos na Figura 7A, o gráfico de Pareto demonstra que apenas a corrente de soldagem, apresenta significância estatística com relação à mudança nos valores do teor de ferro, podendo-se observar que com o aumento da corrente de soldagem, a porcentagem de teor de ferro tende a aumentar. É possível observar esse aumento, fazendo a análise comparativa entre os pares de amostras (1 e 2) e (3 e 4), onde ocorre apenas a mudança na corrente de soldagem deixando a taxa de alimentação fixa (25 g/min e 35 g/min, respectivamente).

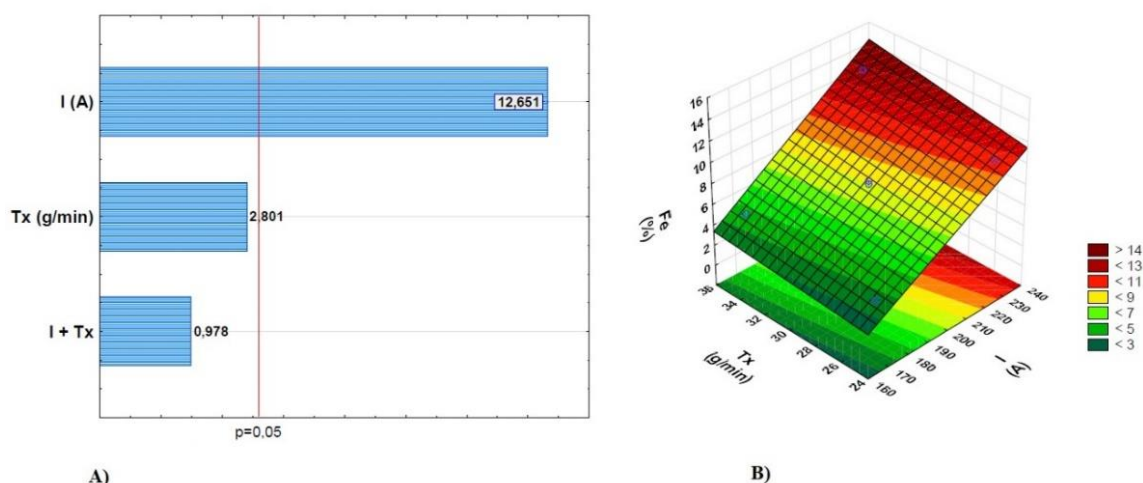


Figura 7 - (A) Gráfico de Pareto para os efeitos das variáveis independentes sobre o teor de ferro (Fe) [%]. (B) Superfície de resposta do teor de ferro *versus* corrente de soldagem *versus* taxa de alimentação. R<sup>2</sup> = 98,25%.

Fonte: Autor.

Este comportamento também é comprovado na Figura 8B, onde pode-se observar a superfície de resposta que foi obtida através da análise estatística. A medida em que ocorre um aumento na corrente de soldagem, chega-se a teores de ferro maiores que 12 %. Isso é explicado pelo maior fornecimento de energia na forma de calor para poça de fusão, ou seja, maior corrente acarretará em maiores temperaturas que tendem a fundir maior quantidade de material e, portanto, um maior teor de ferro estará presente na poça de fusão.

SILVA et al., (2010) afirmam que quanto maior for a diluição, maior será a participação de ferro e carbono no metal de solda, justificando os valores obtidos no experimento 4, o qual se obteve 16,2 % e 12,88 %, para os valores de diluição e teor de ferro respectivamente, entretanto esses valores não são desejados, pois tendem a aumentar a formação de microestruturas frágeis e susceptíveis a ataque corrosivo.

Os dados da Tabela 8, mostram que o modelo apresentado na Equação 2 tem coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 98,25% das variações obtidas e com um valor da razão de  $F_{\text{calculado}}$  por  $F_{\text{tabelado}}$  igual a 6,08, indicando que o modelo é estatisticamente significativo com 95% de confiança e pode ser útil para fins preditivos.

$$Fe_{(I, Tx)} = -10,677 + 0,067 * I - 0,222 * Tx + 0,001 * I * Tx; \quad (2)$$

Tabela 8 - Análise de variância para avaliação do teor de ferro.

Fator	SQ	GL	MQ	$F_{\text{calculado}}$
Regressão	60,337	3	20,125	56,43
Resíduo	1,072	3	0,3575	
F. Ajuste	0,0994			
Erro Puro	0,9732			
Total	61,449	6		
$R^2$	98,25%			
$F_{\text{tabelado}}$	9,28		$F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}$	= 6,08

Fonte: Autor.

### **Influência das variáveis em relação à resistência à polarização:**

Pode-se observar pela Tabela 6 que os valores de  $R_p$  variaram de 324,58 K $\Omega$  a 486,95 K $\Omega$ . A Figura 8A apresenta o gráfico de Pareto, no que se observa que a corrente de soldagem (I), é o efeito de maior significância estatística para variável resistência à polarização.

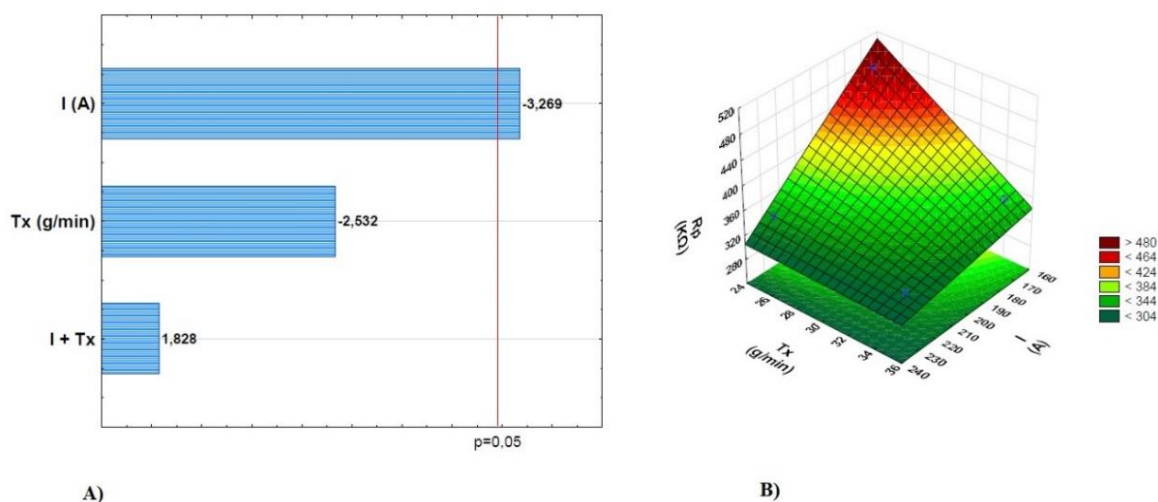


Figura 8 - (A) Gráfico de Pareto para os efeitos das variáveis independentes sobre a resistência à polarização ( $R_p$ ) [ $K\Omega$ ]. (B) Superfície de resposta da resistência à polarização *versus* corrente de soldagem *versus* taxa de alimentação.  $R^2 = 87,2\%$

Fonte: Autor.

A Figura 8B confirma o efeito dos parâmetros de soldagem obtidos na Figura 8A e observa-se que com a diminuição da corrente de soldagem e da taxa de alimentação, aumentam as propriedades anticorrosivas (resistência à polarização), atingindo um valor máximo de aproximadamente  $500 K\Omega$  (experimento 1). Este comportamento pode estar associado ao aporte térmico imposto durante a deposição, uma vez que o mesmo é diretamente proporcional à corrente, ou seja, pode-se relacionar a corrente de maneira que: uma menor corrente de soldagem resulta em uma menor diluição e um menor teor de ferro o que ocasiona uma maior resistência à polarização.

Tabela 9 - Análise de variância para avaliação da resistência à polarização.

Fator	SQ	GL	MQ	$F_{\text{calculado}}$
Regressão	16.011,74	3	5.337,24	6,815
Resíduo	2.349,44	3	783,14	
F. Ajuste	2.316,3			
Erro Puro	33,14			
Total	18361,18	6		
$R^2$	87,2%			
$F_{\text{tabelado}}$	9,28		$F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}} = 0,73$	

Fonte: Autor.

Portanto, os dados da Tabela 9, mostram que o modelo apresentado na Equação 3 tem coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 87,2% das variações obtidas e com um valor da razão de  $F_{\text{calculado}}$  por  $F_{\text{tabelado}}$  igual a 0,73, esse valor indica que existe uma falta de ajuste entre as variáveis.

$$R_p(I, T_x) = 1905,238 - 6,640*I - 41,194*T_x + 0,17*I*T_x; \quad (3)$$

### Influência das variáveis em relação ao potencial de corrosão:

Analisando o gráfico de Pareto (Figura 9A), os valores negativos nas colunas da corrente de soldagem e da taxa de alimentação indicam que à medida que ocorre a diminuição dessas variáveis, o aumento do potencial de corrosão é favorecido, confirmando os resultados obtidos na Tabela 6, onde os valores do potencial de corrosão variaram de -0,562 V a -0,641 V.

A Figura 9B confirma o efeito dos parâmetros de soldagem obtidos na Figura 9A em função do potencial de corrosão dos revestimentos. Para valores mais próximos de zero, as propriedades anticorrosivas dos revestimentos tendem a aumentar, ou seja, o experimento 1 foi o que obteve melhores propriedades por apresentar potencial de corrosão -0,562V.

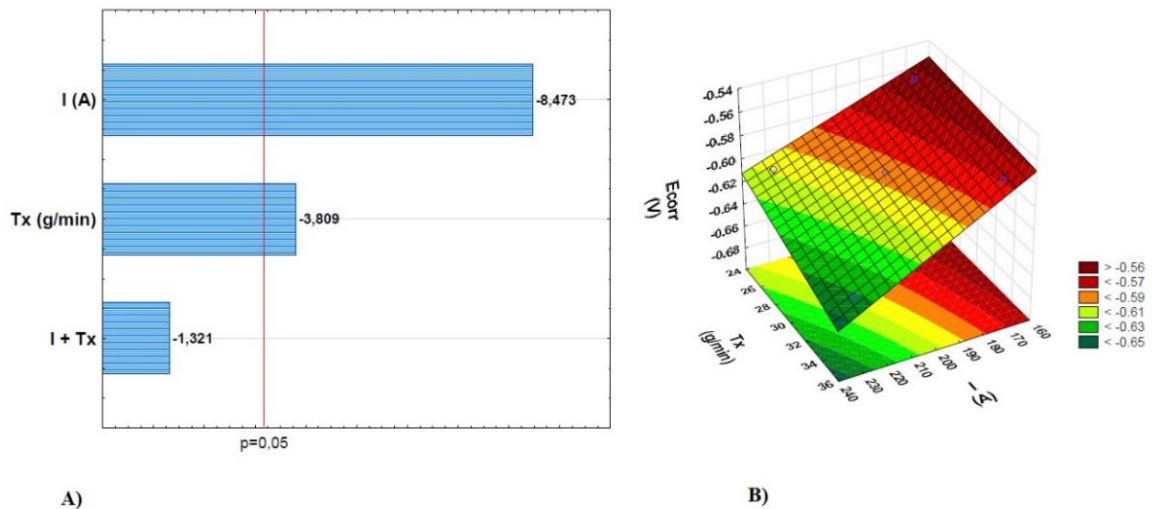


Figura 9 - (A) Gráfico de Pareto para os efeitos das variáveis independentes sobre o potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) [V]. (B) Superfície de resposta do potencial de corrosão *versus* corrente de soldagem *versus* taxa de alimentação.  $R^2 = 96,7 \%$

Fonte: Autor.

Observa-se que a corrente de soldagem e a taxa de alimentação mostraram influência estatística significativa. Os dados da Tabela 10, mostram que o modelo apresentado na Equação 4 tem coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 96,7% das variações obtidas e com um valor da razão de  $F_{\text{calculado}}$  por  $F_{\text{tabelado}}$  igual a 3,16, indicando que o modelo é estatisticamente significativo com 95% de confiança.

$$E_{\text{corr}}(I, T_x) = -0,512 - 0,00005*I + 0,003*T_x - 0,00002*I*T_x; \quad (4)$$

Tabela 10 - Análise de variância para avaliação do potencial de corrosão.

Fator	SQ	GL	MQ	F <sub>calculado</sub>
Regressão	0,00364	3	0,00121	29,37
Resíduo	0,00012	3	4,13E-05	
F. Ajuste	0,000007			
Erro Puro	0,000117			
Total	0,003767	6		
R <sup>2</sup>	96,7%			
F <sub>tabelado</sub>	9,28		F <sub>calc</sub> /F <sub>tab</sub>	= 3,16

Fonte: Autor.

**Influência das variáveis em relação à corrente de corrosão:**

Os valores de corrente de corrosão, variaram de 5,7 A até 21,17 A, como pode ser observado através da Tabela 6. Realizando a análise da Figura 10A, pode-se observar o gráfico de Pareto em que todas as variáveis apresentaram significância estatística na variação da corrente de corrosão, ou seja, com o aumento da corrente de soldagem e taxa de alimentação, a corrente de corrosão tende a se elevar, como pode ser observado na Figura 10B.

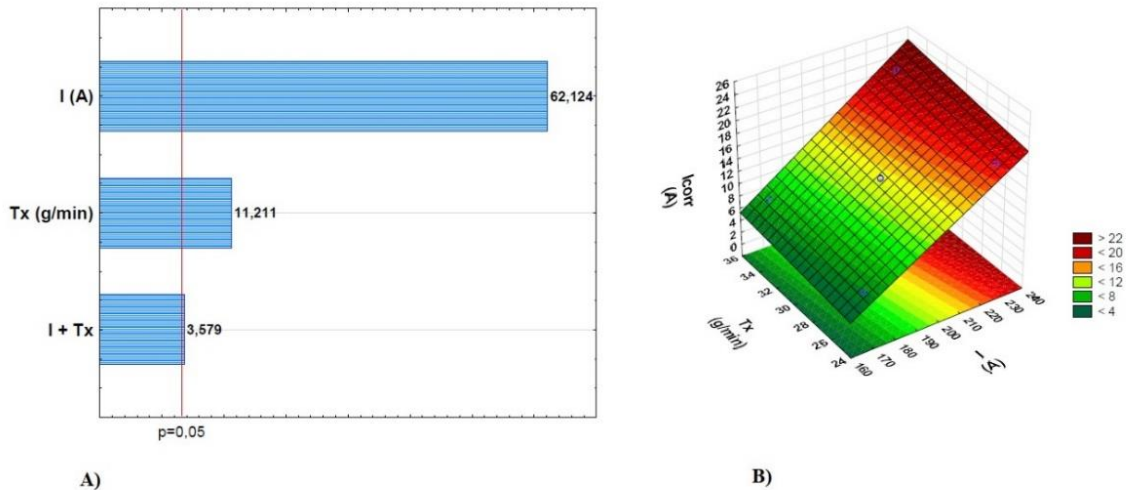


Figura 10 - (A) Gráfico de Pareto para os efeitos das variáveis independentes sobre o potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) [V]. (B) Superfície de resposta do corrente de corrosão *versus* corrente de soldagem *versus* taxa de alimentação.  $R^2 = 99,92\%$

Fonte: Autor.

Portanto, os dados da Tabela 11, mostram que o modelo apresentado na Equação 5 tem coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 99,92% das variações obtidas e com um valor da razão

de  $F_{\text{calculado}}$  por  $F_{\text{tabelado}}$  igual a 143,6, indicando que o modelo é estatisticamente significativo com 95% de confiança e pode ser útil para fins preditivos.

$$I_{\text{corr}}(I, T_x) = -22,504 + 0,142 \cdot I - 0,266 \cdot T_x + 0,002 \cdot I \cdot T_x; \quad (5)$$

Tabela 11 - Análise de variância para avaliação da corrente de corrosão.

Fator	SQ	GL	MQ	$F_{\text{calculado}}$
Regressão	177,90	3	59,301	1.332,61
Resíduo	0,1335	3	0,0445	
F. Ajuste	0,1273			
Erro Puro	0,0062			
Total	178,037	6		
$R^2$	99,92%			
$F_{\text{tabelado}}$	9,28		$F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}$	= 143,6

Fonte: Autor.

A avaliação da resistência à corrosão dos revestimentos foi conduzida pela técnica de polarização potenciodinâmica linear (PPL) e, para confirmação, utilizou-se a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE). Na Figura 11, é possível observar as curvas de polarização potenciodinâmica dos revestimentos dos experimentos 1 e 4, os quais apresentaram a menor e a maior diluição, 4,33% e 16,2%, respectivamente.

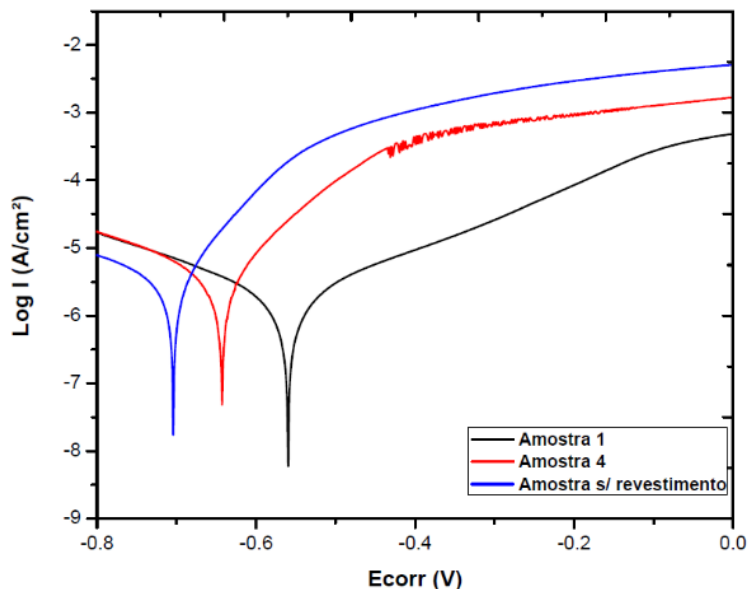


Figura 11 - Curva de polarização dos experimentos com maior diluição (experimento 4) – em vermelho e menor diluição (experimento 1) – em preto e amostra do aço sem revestimento – em azul.

Fonte: Autor.



O experimento 1 com menor diluição, apresentou potencial de corrosão maior que o da amostra do experimento 4 com maior diluição, o que indica melhores propriedades anticorrosivas, ligado ao fato de que o primeiro experimento apresentou os seguintes resultados: teor de ferro (3,64 %) e corrente de corrosão (5,7 A) menores, o que favorece às propriedades anticorrosivas, além da resistência à polarização maior (486,95 K $\Omega$ ).

Para confirmar os resultados obtidos nas curvas de PPL sobre a resistência à corrosão, foram realizadas medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica. A Figura 12 mostra o diagrama de impedância dos revestimentos com Inconel 625 dos mesmos experimentos avaliados por PPL.

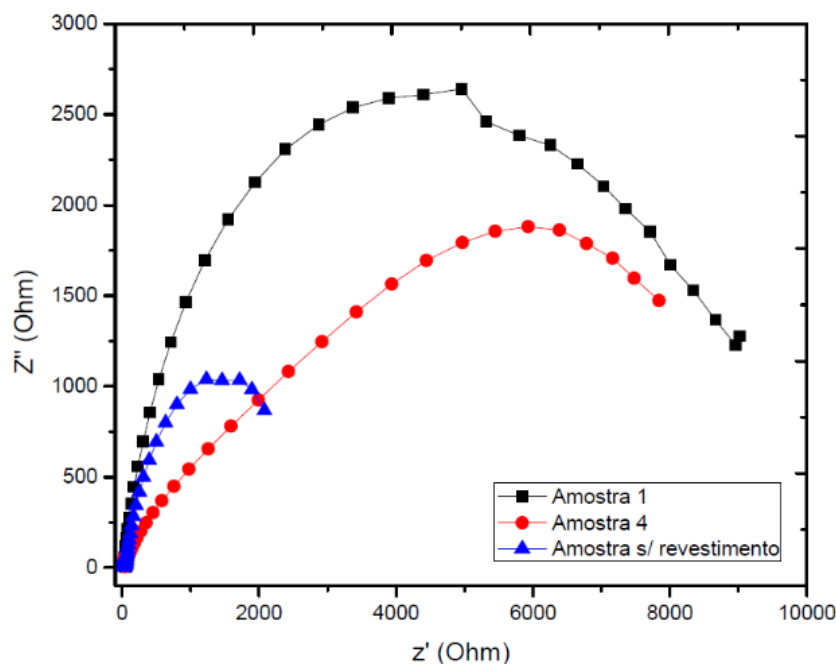


Figura 12 - Curva de impedância dos experimentos com maior diluição (experimento 4) – em vermelho e menor diluição (experimento 1) – em preto e amostra do aço sem revestimento – em azul.

Fonte: Autor.

Nesse diagrama, traça-se um semicírculo que melhor se ajuste à curva a partir do eixo das abcissas e quanto maior for o raio desse semicírculo, maior será a dificuldade pelo qual um sinal elétrico (potencial ou corrente) enviado à amostra encontrará ao percorrê-la, ou seja, maior será a resistência à corrosão do material exposto ao meio corrosivo.

#### 4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

O processo de soldagem PTA-P foi utilizado com sucesso para soldagem de revestimento. 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.

O experimento 1 foi o que apresentou melhor resistência à corrosão, por apresentar menores valores de diluição e teor de ferro, cujos parâmetros de corrente de soldagem e taxa de alimentação foram de 170 A e 25 g/min, respectivamente. Tais resultados são semelhantes aos resultados encontrados por BATISTA, (2011) que encontrou resultados que mostram que quanto menor a diluição e menor o teor de ferro maior a resistência a corrosão.

O parâmetro que apresentou maior influência estatística para o aumento da resistência à corrosão foi a corrente de soldagem, pois possui efeito direto na diluição e na composição química do revestimento.

## REFERÊNCIAS

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: 10 set. 2019.

ANTOSZCZYSZYN, T. J., et al. (2014). "**Impact of dilution on the microstructure and properties of Ni-based 625 alloy coatings.**" Soldagem & Inspeção 19(2): 134-144.

BATISTA, V. R., **Influencia dos parâmetros de soldagem sobre as características de revestimentos de liga de níquel aplicados em aços API 5L Gr B pelo processo arco submerso.**, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

BHARATH, R. R., et al. (2008). "**Optimization of process parameters for deposition of Stellite on X45CrSi93 steel by plasma transferred arc technique.**" Materials & Design 29(9): 1725-1731.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**. LTC, 9ed.

D'OLIVEIRA, A. S. C. M., et al. (2002). "**High temperature behavior of plasma transferred arc and laser Co-based alloy coatings.**" Applied Surface Science 201(1): 154-160.

DEUIS, R. L., et al. (1998). "**Metal-matrix composite coatings by PTA surfacing.**" Composites Science and Technology 58(2): 299-309.

DÍAZ, V. M. V., **Inovação do Equipamento e Avaliação do Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTAP) para Soldagem Fora de Posição**. 2005, 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DÍAZ, V. V., et al. (2010). "**Deposição por plasma com arco transferido**" Soldagem & Inspeção." 15: 41-51.

DOS SANTOS, Aureliano Xavier. **Avaliação da resistência à corrosão de revestimento à base de Inconel 625 utilizando os processos de soldagem MIG e Plasma Pó.** 2014.

GIORGETTI, V. et al. (2019). "**Stress corrosion cracking and fatigue crack growth of an API 5L X70 welded joint in an ethanol environment.**" International Journal of Pressure Vessels and Piping 169: 223-229.

HAERI, M., et al. (2011). "**The voltage-dependent electrochemical impedance spectroscopy of CoCrMo medical alloy using time-domain techniques: Generalized Cauchy–Lorentz, and KWW–Randles functions describing non-ideal interfacial behavior.**" Corrosion Science 53(2): 582-588.

LIU, Z., et al. (2007). "**Improving corrosion and wear performance of HVOF-sprayed Inconel 625 and WC-Inconel 625 coatings by high power diode laser treatments.**" Surface and Coatings Technology 201(16): 7149-7158.

LLOYD, A. C., et al. (2004). "**Cr, Mo and W alloying additions in Ni and their effect on passivity.**" Electrochimica Acta 49(17): 3015-3027.

LUCHTENBERG, P., et al. (2019). "**Effect of welding energy on the corrosion and tribological properties of duplex stainless-steel weld overlay deposited by GMAW/CMT process.**" Surface and Coatings Technology

MARCONI, M.; MARCONI, B. **Powder Plasma Arc Welding on Thick Walled Pipes.** International Institute of Welding, 16 p., Paper 11. 2005

PERALTA-ZAMORA, P., et al. (2005). "**Por que otimização multivariada?**" "Engenharia Sanitária e Ambiental." 10: 106-110.

REIS, R. Pablo; SCOTTI, Américo. **Fundamentos e Prática da Soldagem a Plasma.** São Paulo. Arliber Editora, 2007.

SEXTON, L., et al. (2002). "**Laser cladding of aerospace materials.**" Journal of Materials Processing Technology 122(1): 63-68.

SILVA, M. M. d., et al. (2010). "**Caracterização de solda de revestimento de AWS 317L depositados por GMAW duplo arame em aços ASTM a 516 gr 60 para uso na indústria do petróleo**" Soldagem & Inspeção." 15: 225-233.

SILVA, R. H. G. e. and J. C. Dutra (2012). "**Processo PTA-P - Uma revisão da literatura como base para inovações: parte 2 de 2: comportamento térmico e cinemático do pó, parâmetros e consumíveis do processo**" Soldagem & Inspeção." 17: 173-183.

SINGH, D. H. and P. Jain (2015). **Past, present and future -the characterization of surface topography of plasma transferred arc coatings.**

SUUTALA, J., et al. (2006). "**Laser-assisted spraying and laser treatment of thermally sprayed coatings.**" Surface and Coatings Technology 201(5): 1981-1987.

WALSH, D. A., et al. (2009). "**Visualization of the local electrochemical activity of thermal sprayed anti-corrosion coatings using scanning electrochemical microscopy.**" Electrochimica Acta 54(20): 4647-4654.