



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

BEATRIZ CÂNDIDA DE FARIAS FERREIRA

Análise da resistência a corrosão do aço API 5L X70 revestido com inonel 625 por soldagem  
plasma pó e por arco submerso

Cabo de Santo Agostinho - PE

2021

BEATRIZ CÂNDIDA DE FARIAS FERREIRA

Análise da resistência a corrosão do aço API 5L X70 revestido com inonel 625 por soldagem plasma pó e por arco submerso

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Aureliano Xavier dos Santos

Cabo de Santo Agostinho - PE

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- F383a      Ferreira, Beatriz Cândida de Farias  
            Análise da resistência a corrosão do aço API 5L X70 revestido com inonel 625 por soldagem plasma pó e por arco submerso / Beatriz Cândida de Farias Ferreira. - 2021.  
            45 f. : il.
- Orientador: Aureliano Xavier dos Santos.  
            Inclui referências.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, , Cabo de Santo Agostinho, 2022.
1. Corrosão. 2. Soldagem. 3. Revestimento. 4. SAW. 5. PTA. I. Santos, Aureliano Xavier dos, orient. II. Título

CDD

---

BEATRIZ CÂNDIDA DE FARIAS FERREIRA

Análise da resistência a corrosão do aço API 5L X70 revestido com inonel 625 por soldagem plasma pó e por arco submerso

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 09 de dezembro de 2021.

Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Aureliano Xavier dos Santos, UFRPE

---

Prof. Dr. Leandro Cássio de Paula, UFRPE

---

Profa. Dra. Verônica Cristhina de Souza Diniz, UFRPE

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo seu amor e graça derramados em minha vida, e por sempre me dá forças e coragem nos momentos difíceis.

A meus pais, Benjamira e Ivanildo, e minha avó Abineia, pois eles não mediram esforços pra que este sonho se realizasse, sem a compreensão, ajuda e confiança deles nada disso seria possível. Agradeço também por todos os ensinamentos e valores passados, pois são eles que me fizeram ser a pessoa que sou hoje.

Aos meus irmãos, Bruna e Breno, que me ensinaram a amar, compartilhar e querer ser uma pessoa melhor a cada dia.

A todos os amigos que estão presentes em minha vida, especialmente aos que conquistei na faculdade: Venicius Leony, Isabella Ferreira e Pamela Mayara, que dividiram comigo todos os perrengues e alegrias ao longo desses anos.

Ao meu orientador, Aureliano, que me auxiliou e esteve presente ao longo desse trabalho e acreditou em mim para realizar uma iniciação científica.

A todos os professores que contribuíram na minha formação.

A Universidade Federal de Campina Grande, especialmente ao Laboratório de Soldagem e de Corrosão da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, pela realização das soldagens e da análise de corrosão dos experimentos.

## RESUMO

Anualmente a indústria do petróleo investe grandes quantias na manutenção de dutos, principalmente em medidas contra a corrosão. Assim, buscam-se soluções que combinem baixo custo, reprodutibilidade e propriedades consistentes. Uma delas é a utilização de materiais que apresentam elevadas propriedades mecânicas e anticorrosivas na forma de revestimentos que podem ser depositados por soldagem. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes parâmetros de soldagem na resistência à corrosão de revestimentos de liga de inonel 625 depositados pelo aço API 5L X70 pelo processo de soldagem PTA, avaliar as amostras com maior e menor diluição e utilizar os parâmetros desses experimentos para realizar o revestimento da soldagem por arco submerso SAW, a fim de comparar os processos. Os parâmetros foram otimizados através de planejamento experimental fatorial e os resultados analisados pela Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). As amostras foram avaliadas principalmente por diluição (D), teor de ferro (Fe) e resistência à corrosão por polarização Potenciodinâmica linear (PPL).

**Palavras-chave:** corrosão; soldagem; PTA-P; SAW; Revestimento.

## ABSTRACT

Annually, the oil industry invests large amounts in pipeline maintenance, mainly in anti-corrosion measures. Thus, solutions are sought that combine low cost, reproducibility and consistent properties. One of them is the use of materials that have high mechanical and anti-corrosive properties in the form of coatings that can be deposited by welding. This study aimed to evaluate the effects of different welding parameters on the corrosion resistance of inconel 625 alloy coatings deposited by API 5L X70 steel by the PTA welding process , evaluate samples with higher and lower dilution and use the parameters of these experiments to perform SAW submerged arc welding coating in order to compare the processes. The parameters were optimized through factorial experimental design and the results analyzed by the Response Surface Methodology (MSR). The samples were mainly evaluated by dilution (D), iron content (Fe) and resistance to corrosion by linear potentiodynamic polarization (PPL).

**Key-words:** corrosion; welding; PTA; inconel; SAW.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>11</b>
<b>3.1</b>	<b>Aço ARBL API 5L X70 .....</b>	<b>11</b>
<b>3.2</b>	<b>Ligas de Níquel .....</b>	<b>12</b>
3.2.1	Classificação das superligas de níquel.....	12
3.2.2	Composição das superligas de níquel.....	13
3.3	Processos de Soldagem.....	15
3.3.1	Soldagem a Plasma por Arco Transferido.....	15
3.3.2	Soldagem por Arco Submerso.....	18
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiais.....</b>	<b>22</b>
<b>4.2</b>	<b>Métodos .....</b>	<b>22</b>
4.2.1	Procedimentos de Soldagem.....	22
4.2.2	Planejamento Experimental.....	24
4.2.3	Depósito dos Revestimentos.....	25
4.2.3.1	SOLDAGEM PTA-P.....	25
4.2.3.2	SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO .....	27
4.2.4	Preparação Metalográfica.....	28
4.2.4.1	CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E CÁLCULO DA DILUIÇÃO .....	28
4.2.5	Análise Química .....	29
4.2.6	Análise de Corrosão.....	29
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>30</b>
<b>5.1</b>	<b>Análise dos revestimentos depositados por soldagem PTA-P .....</b>	<b>30</b>
<b>5.2</b>	<b>Análise Estatística.....</b>	<b>31</b>
<b>5.3</b>	<b>Análises de Corrosão .....</b>	<b>34</b>
<b>5.4</b>	<b>Análise comparativa dos revestimentos depositados por soldagem PTA-P e SAW ..</b>	<b>35</b>
5.4.1	Caracterização geral .....	35
5.4.2	Avaliação da Resistência à Corrosão.....	36
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>38</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>39</b>



## 1 Introdução

O petróleo junto ao carvão e o gás natural representam cerca de 80% da matriz energética mundial. Como a demanda de petróleo e gás natural crescem a cada dia, as indústrias de energia são forçadas a extrair esses recursos de ambientes agressivos (MOHTADI-BONAB et al., 2015). E por isso é necessário aprimorar os materiais dos dutos, responsáveis pelo transporte de petróleo e gás (SANTOS; MACIEL; SANTANA, 2015). Pois os aços de tubulação além de apresentarem alta resistência e tenacidade à fratura, o que os torna adequados para ambientes agressivos, também precisam ser uma opção econômica e segura para o transporte desses recursos a longas distâncias (MOHTADI-BONAB; SZPUNAR; RAZAVI-TOUSI, 2013).

Os aços que possuem essas características são os de baixa liga e alta resistência e por isso são utilizados para a fabricação desses dutos. Dentre esses aços, o mais utilizado aqui no Brasil é o ARBL API 5L X70 pois apresentam uma alta resistência mecânica, boa tenacidade, ductilidade e soldabilidade (ALIZADEH; BORDBAR, 2013; BEIDOKHTI; DOLATI; KOUKABI, 2009; ANTUNES, R. A, 2013; MASOUMI et al., 2016). Porém, como atuam em ambientes agressivos e transportam um fluido que tem um elevado grau de corrosividade, são susceptíveis a corrosão.

Diante deste problema surgiram algumas técnicas de proteção superficial, que podem aumentar o tempo de vida útil dessas malhas dutoviárias e diminuir o risco de vazamento do petróleo por corrosão. Como por exemplo, metalização por aspensão térmica, galvanização, cladização, eletrodeposição, pintura, difusão, redução química (niquelação) e soldagem para revestimento (DAVIS, J., 1993).

A soldagem para revestimento é uma técnica que se destaca, pois através dela pode-se obter propriedades não encontradas no material de base através da união metalúrgica com um material diferente, aumentando assim resistência à corrosão do metal base (BOND; BECKER; D'OLIVEIRA, 2011). São vários os processos de soldagem utilizados para revestimento tais como: Processo a laser, (LBW), processos GTAW ou TIG com alimentação automática de arame (frio e quente), processo GMAW, processo por arco submerso (SAW) e o processo à Plasma por Arco Transferido (PTA) (DAVIS, J., 1993; TEICHMAN, 2016).

Dentre esses processos o PTA pode ser destacado pela possibilidade de se obter uma baixa diluição e um depósito de menor reforço e maior largura, deixando um aspecto uniforme no revestimento e com melhor molhamento (ÖZEL; GÜRGENÇ, 2018; TIGRINHO; D'OLIVEIRA, 2007). Neste processo o material de adição tem a forma de pó. Já a soldagem

por arco submerso (SAW), se destaca por ser um processo econômico em visto que apresenta um alto rendimento, proporcionando uma alta taxa de deposição, além disso seus equipamentos são mais baratos e fáceis de manusear (TEICHMAN, 2016).

Para a aplicação desses revestimentos as ligas de níquel vêm sendo bastante sugeridas já que possuem habilidade de resistirem a uma variedade de condições extremas de operação, as quais envolvem meios corrosivos, elevadas temperaturas e/ou alta tensão (DAVIS; ASM INTERNATIONAL, 2000). Para uso no seguimento do transporte do petróleo foi desenvolvida a liga NiCrMo-3 conhecida como liga Inconel 625 (YIN et al., 2009).

Conforme os estudos (L.E. SHOEMAKER, 2005; CORRIEU et al., 1994) apresentaram, o uso da liga inconel 625 para soldar aços de alta resistência ou aços inoxidáveis, assim, melhorando significativamente as propriedades mecânicas em alta temperatura e a resistência à corrosão de estruturas soldadas. No entanto, a tenacidade, resistência à fadiga e resistência à ruptura por fluência da solda podem obviamente diminuir devido à precipitação da fase laves intermetálica, quando uma estrutura de solda é empregada sob elevadas temperaturas por longos períodos.

Então o objetivo deste trabalho é avaliar os revestimentos a base de ligas de níquel aplicados por soldagem com arco Plasma Transferido com alimentação em pó (PTA-P) e Soldagem por Arco Submerso (SAW) considerando o efeito dos parâmetros do processo sobre a diluição, teor de ferro e análise da resistência à corrosão.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo Geral**

Comparar a resistência à corrosão do aço API 5L X70 revestido com inconel 625 pelo processo de Soldagem Plasma Pó (PTA-P) e Soldagem por Arco Submerso (SAW).

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar os melhores parâmetros do processo de soldagem plasma pó para a deposição do revestimento;
- Avaliar as amostras com maior e menor diluição pelo processo de plasma pó e utilizar os parâmetros desses experimentos para realizar o revestimento da soldagem por arco submerso;

- Avaliar a resistência à corrosão dos revestimentos a base da liga de níquel inconel 625 depositados através do processo PTA-P e SAW na condição após depositado;
- Comparar a resistência à corrosão dos revestimentos depositados.

### **3 Revisão Bibliográfica**

#### **3.1 Aço ARBL API 5L X70**

Os vários graus de aços caracterizados pela norma API 5L fornecem uma série de aços com resistência mecânica variada, associada a valores expressivos de tenacidade e resistência a fragilização por hidrogênio. Estes aços são classificados como aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), os quais são aços micro ligados que apresentam, geralmente, microestrutura típica de ferrita-perlita. Sua composição química é similar à de um aço baixo-carbono, mas com micro adições de elementos de liga, que garantem propriedades mecânicas superiores, melhores propriedades de soldabilidade e tenacidade do material (JÚNIOR, 2004, TURHAN, 2020).

Estes aços têm sido utilizados em aplicações que requerem material de custo relativamente baixo, boa resistência mecânica e boa tenacidade. Devido às suas características de tenacidade, são muito utilizados para aplicações estruturais já que permitem que a estrutura apresente deformação plástica anterior à ruptura. Esta deformação pode ser detectada durante rotinas de inspeção, diminuindo o risco de ocorrer uma falha catastrófica do componente (JÚNIOR, 2004, LIGANG et al., 2017).

Atualmente aços ARBL são largamente empregados na construção de componentes industriais (como dutos e tubulações, vasos de pressão, reatores e tanques); em estruturas navais e offshore, em componentes estruturais para veículos; na construção civil, entre outros. E atualmente, o aço padrão para a construção de malhas dutoviárias é o ARBL API 5L X70 (TURHAN, 2020). O grau 5L indica o limite mínimo e máximo de resistência ao escoamento para estes aços, sendo o limite mínimo de 70ksi e máximo de 90ksi para este aço (SANTOS, 2014).

O uso destes aços apresenta como umas das principais vantagens menor peso e custos envolvidos no transporte e montagem dos dutos, pois a espessura da parede deles pode ser diminuída para a mesma pressão interna (BAI & BAI, 2005), como também a pressão interna pode ser elevada (até o limite máximo de 72% do limite de escoamento do tubo) e a espessura de parede do tubo mantida inalterada, aumentando o volume de produto transportado

(SICILIANO, 2008). Entretanto os aços ARBL são susceptíveis a corrosão e ao desgaste, devido ao fluido que transportam e ao ambiente agressivo, ao qual são submetidos necessitando assim aplicações de revestimentos com materiais mais nobres tais como, as ligas de níquel,

### **3.2 Ligas de Níquel**

O níquel e suas ligas são extremamente importantes na indústria por causa de sua resistência a uma variedade de condições extremas de operação, as quais envolvem meios corrosivos, elevadas temperaturas e/ou alta tensão (ASM, 2000). Mas o que impede a produção de componentes maciços com essas ligas é o elevado custo.

As superligas a base de níquel, possuem alta resistência mecânica em elevadas temperaturas, alta abrasividade devido aos constituintes químicos da liga, alta ductilidade e alta taxa de encruamento com o trabalho mecânico. A exposição desta liga a altas temperaturas altera seu limite de resistência e sua ductilidade. São resistentes ao calor e à corrosão quando submetidas a meios quimicamente agressivos (KOU et al., 2018). Permanecem com elevada resistência mecânica em altas temperaturas e a corrosão é relativamente lenta.

As superligas de níquel com estrutura CFC, apresentam grande capacidade de manter a resistência à tração, à ruptura e boas propriedades de fluência em temperaturas muito mais altas do que as ligas de matriz cúbica de corpo centrado (CCC). Este comportamento é devido a vários fatores, incluindo o excelente módulo de elasticidade e a alta difusividade que os elementos secundários possuem nesse tipo de matriz. A ductilidade nas condições de serviço também é importante, e a maioria das superligas apresenta boa ductilidade. As superligas em geral apresentam também boa resistência ao impacto, à fadiga de alto e de baixo ciclo e à fadiga térmica (SOUSA, 2009).

#### **3.2.1 Classificação das superligas de níquel**

As superligas à base de níquel são amplamente classificadas em duas categorias, tipos de endurecimento por precipitação e por solução sólida. As ligas endurecidas por precipitação contêm quantidades substanciais de ferro (Fe) e formam uma classe distinta de superligas. Ligas endurecidas por solução sólida contêm principalmente molibdênio (Mo) e nióbio (Nb), juntamente com o cromo (Cr). A liga inconel 625 destaca-se dentre a categoria das superligas de níquel. O Cr e o Mo presentes, favorecem a formação da fase  $\gamma$ , onde reduzem a solubilidade da matriz para os elementos de endurecimento de precipitação como Ti, Al e Nb, que também

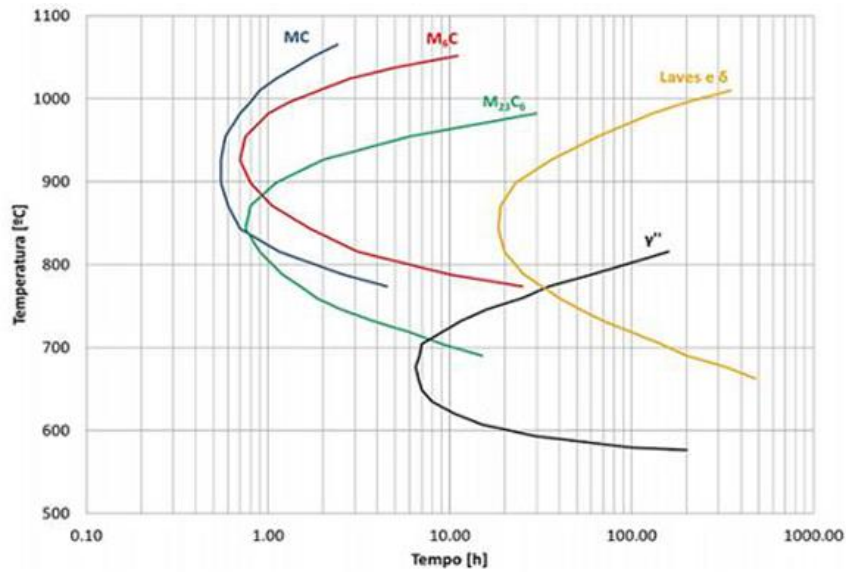
promovem à expansão do parâmetro de rede da matriz  $\gamma$  devido à diferença no volume atômico entre a fase  $\gamma$  e o elemento de liga, resultando em reforço (SUKUMARAN; GUPTA; ANIL KUMAR, 2017).

### 3.2.2 Composição das superligas de níquel

Os solutos essenciais em uma superliga a base de níquel são alumínio e/ou titânio, com uma concentração total menor que 10 por cento. Isto gera uma microestrutura equilibrada de duas fases, consistindo em gama ( $\gamma$ ) e gama primária ( $\gamma'$ ). A gama primária que é responsável pela resistência do material em temperaturas elevadas e também pela ótima resistência à fluência. A quantidade de  $\gamma'$  depende da composição química e da temperatura.

Porém no caso da liga inconel 625, que foi desenvolvida inicialmente como uma liga endurecida em solução sólida, pode-se observar a precipitação de fases intermetálicas e carbonetos quando submetida a um tratamento de envelhecimento na faixa de 823-1023 (550 – 750°C). O endurecimento por precipitação nessa liga é principalmente derivado da fase gama primária –  $\gamma'$  [ $\text{Ni}_3(\text{Nb}, \text{Al}, \text{Ti})$ ] que ocorre na seguinte faixa de temperatura (550 – 650°C (SMC, 2006). A fase gama primária é transformada em fase ortorrômbica – delta ( $\delta$ ) [ $\text{Ni}_3(\text{Nb}, \text{Mo})$ ] ao prolongarmos o envelhecimento. A fase delta também pode ser encontrada diretamente por precipitação em solução sólida supersaturada em temperaturas superiores à 750°C. A precipitação de  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{M}_6\text{C}$  e carbonetos MC ocorrerão na faixa dos 760 – 980°C. Os primeiros carbonetos presentes no estado de não dissolução durante o recozimento são decompostos em  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  e  $\text{M}_6\text{C}$  em exposições prolongadas em temperaturas elevada, como pode ser observada na Figura 1 (SOUSA, 2009). Essas fases secundárias podem alterar as propriedades mecânicas do material e diminuir sua resistência à corrosão.

Figura 1- Curva TTT da liga inconel, formação de carbonetos e fases



Fonte: OLIVEIRA, 2017

A liga de Níquel-Cromo-Molibdênio denominada inconel 625 é uma marca registrada da Special Metals Corporation. É utilizada para aplicações que requerem alta resistência à corrosão e elevada resistência mecânica. Esta liga apresenta excelente versatilidade de fabricação, sendo uma opção interessante para revestimentos superficiais de componentes de equipamentos sujeitos à corrosão em meio aquoso salino (OLIVEIRA, 2017).

Esta superliga à base de níquel possui propriedades de alta resistência mecânica, resistência à oxidação em uma ampla faixa de temperatura, elevada resistência à ruptura em altas temperaturas. Também apresenta uma ótima resistência à corrosão (DAVIS; ASM INTERNATIONAL, 2000). A presença de molibdênio na composição química do Inconel625 garante excelente resistência à corrosão por pites e por fresta, e o nióbio confere alta soldabilidade e resistência à corrosão intergranular a essas ligas (RAMOS,2017).

O mecanismo de proteção contra corrosão dessas ligas é semelhante aos dos aços inoxidáveis: formação de um filme de passivação de óxido de cromo na superfície da liga. Além disso, essa liga contém predominantemente, em sua composição, níquel, que é resistente à corrosão, por característica intrínseca (YIN et al., 2009). Por estas razões, as superligas de níquel, vem sendo bastante utilizada como metal de adição, em processos de soldagem para revestir componentes e equipamentos da indústria do petróleo e gás natural (SANTOS,2014).

### **3.3 Processos de Soldagem**

Dentre as técnicas de proteção de superfícies a do revestimento por soldagem é bem atrativa, por oferecer a proteção através da aplicação de revestimentos unidos metalurgicamente ao substrato. Vários processos de soldagem vêm sendo utilizados para este fim tais como: Processo a laser, (LBW), processos GTAW ou TIG com alimentação automática de arame (frio e quente), processo GMAW, processo a arco submerso (SAW) e processo a Plasma por Arco Transferido (PTA). Todos eles têm a finalidade de aplicação de uma camada protetora de um material com propriedades superiores sobre o substrato.

#### **3.3.1 Soldagem a Plasma por Arco Transferido**

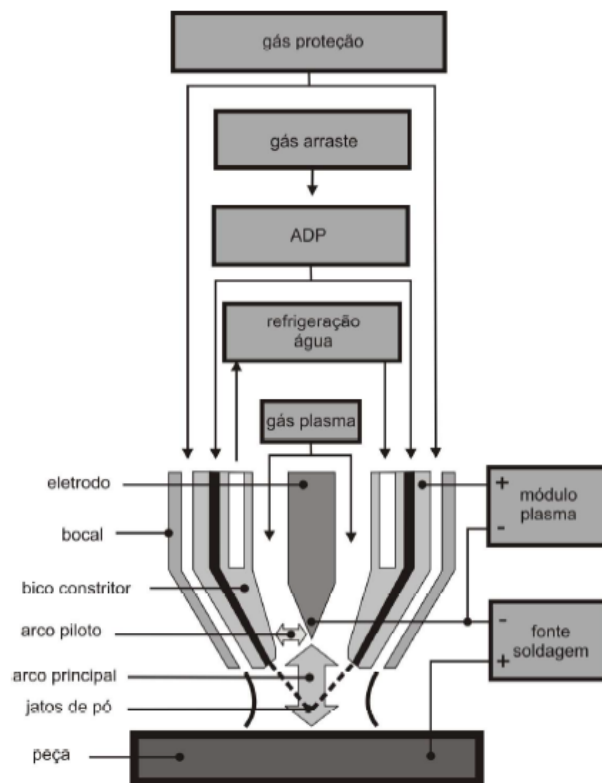
O processo de soldagem com arco transferido com alimentação em pó, tem uma aplicação diferente das convencionais. Esse processo é bastante utilizado para revestimento de superfícies, afim de melhorar as propriedades mecânicas e anticorrosivas. A soldagem de revestimento é um processo no qual uma liga é depositada na superfície de um metal de base para colocá-lo nas dimensões originais ou para obter alguma propriedade desejada tal como, resistência ao desgaste, impacto, corrosão, etc. (RIBEIRO, 2014).

A principal diferença da soldagem de revestimento em relação às aplicações convencionais de soldagem é a geometria do cordão de solda. Diferente das aplicações convencionais, onde se deseja alta penetração para garantir a resistência da junta soldada, na soldagem de revestimento a geometria do cordão desejado, se resume a grandes larguras, altos reforços, baixas penetrações e baixos percentuais de diluição (GOMES, 2010).

A obtenção deste perfil geométrico característico é importante para que o processo permita cobrir a maior área possível com o menor número de passes, assim, economizando material e tempo. E por isso, os parâmetros desse processo é um dos maiores desafios, pois eles precisam estar ajustados adequadamente, para que o material depositado adquira a geometria desejada (GOMES, 2010).

A soldagem PTA-P consiste na união por fusão das partes a serem unidas através de um arco elétrico formado entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e a peça (SCOTTI; REIS, 2007). Observar-se na Figura 2, o material a ser depositado no processo de soldagem é na forma de pó e é transportado a partir do alimentador até a tocha com o auxílio de mangueiras através de um fluxo de gás, conhecido como gás de arraste. O processo pode ser manual ou automático, a escolha da tocha depende da aplicação.

Figura 2- Esquema da soldagem PTA-P



Fonte: ALVES, 2011

Os equipamentos básicos desse processo podem ser observados na Figura 3. Sendo os principais: fonte de energia para o arco principal, uma fonte de corrente para o arco piloto para a ignição da tocha, uma tocha de soldagem refrigerada, um equipamento para armazenar e transferir o pó e as válvulas reguladoras dos gases de proteção, arraste e plasma (SILVA; DUTRA, 2012a).

Figura 3- Equipamentos básicos da soldagem PTA-P



Fonte: SILVA; DUTRA, 2012a



Os parâmetros que controlam a qualidade da solda são a taxa de alimentação do material de adição, a vazão dos gases (gás de proteção, gás de plasma, gás de transporte), a corrente de soldagem, a distância bico-peça e a velocidade de soldagem (SANTOS,2014).

A corrente de soldagem é a variável mais importante do processo, pois ela interfere no calor que é aportado à peça, e uma corrente mal dimensionada pode trazer irregularidades na poça fundida. Por exemplo, correntes muito baixas podem causar falta de fusão do material depositado e do material de base, enquanto correntes demasiadas, podem causar excesso de diluição, causando maior oxidação do cordão de solda, que pode ser prejudicial para aplicações de revestimento (SILVA; DUTRA, 2012b).

A distância bico-peça é a variável que influencia diretamente na largura do cordão de solda. Quanto maior a distância aumenta o jato plasma sobre a peça, aumentando a largura do cordão e diminuindo penetração devido ao aumento da área de incidência do arco sobre o substrato (DÍAZ; DUTRA; D´OLIVEIRA, 2010).

A vazão dos gases interfere na qualidade e acabamento da solda, a vazão do gás plasma interfere na eficiência térmica da solda, então com o aumento da vazão maior calor é transferido a peça, o que junto com outras variáveis pode causar aumento de diluição. Sobre a vazão do gás de arraste precisa ser bem calculada, pois uma excessiva vazão pode causar turbulência e aglomeração de partículas não fundidas. A baixa vazão ocasiona falhas no transporte do pó. Quanto a vazão do gás de proteção, se for ineficiente pode ocasionar a inclusão de óxidos e componentes externos, trazendo porosidade a peça. (SILVA; DUTRA, 2012b)

A taxa de alimentação é uma das variáveis que interfere na diluição na solda, pois o pó tem um efeito de isolante térmico entre o arco e o material de base, então quanto maior a quantidade de pó mais calor é retirado da peça e menor será a diluição., porém taxas demasiadamente altas podem causar falta de fusão do pó. (SILVA; DUTRA, 2012b)

A velocidade de soldagem é a variável que influencia a qualidade do cordão de solda, pois está relacionada com a quantidade de calor transferido a peça. Uma alta velocidade pode ocasionar a falta de penetração e se for muito baixa pode ocorrer a oxidação superficial do cordão. (SANTOS, 2014)

As principais características dos depósitos obtidos pelo processo PTA são depósitos densos e homogêneos, com excelente ligação metalúrgica com o metal de base, com baixa diluição (5% a 20%) e mínima distorção do substrato, grande flexibilidade de composição química de material que pode ser depositado, (por que permite a mistura de pós com composições químicas diversas), revestimentos com 0,6 a 6 mm de espessura podem ser

depositados rapidamente em um único passe (SANTOS,2014). Por esses motivos que este processo tem se destacado entre os demais, para aplicações na indústria petrolífera.

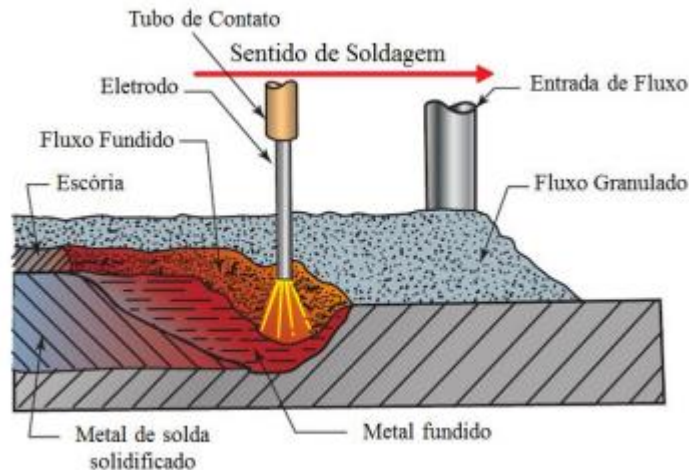
### **3.3.2 Soldagem por Arco Submerso**

A soldagem por arco submerso foi desenvolvida, nos Estados Unidos no ano de 1935, para contribuir com a fabricação de equipamentos pesados e na construção de navios e tubos, atendendo as demandas de produtividade e garantindo os parâmetros de qualidade. Desde então esse processo vem se aprimorando, mantendo suas características básicas, e se adequando para satisfazer as exigências de novas aplicações e novos materiais.(WAINER; BRANDI; MELLO, 1992)

Segundo a AWS (American Welding Society), a soldagem por arco submerso é um processo de soldagem no qual um arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo consumível e o material a ser soldado, o qual, é coberto e protegido por uma manta de material granular fusível, chamado fluxo, que é colocado sobre a área da junta à frente do arco. O metal de adição é obtido a partir de um fio de eletrodo que é continuamente alimentado através da manta de fluxo para o arco e a poça de fusão. O fluxo é de grande importância para alcançar altas taxas de deposição e características de depósito de solda de alta qualidade. Além de proteger o arco de vista, o fluxo fornece uma escória que protege o metal de solda conforme ele esfria. A escória também pode desoxidar e refinar o metal de solda, isolar a solda para reduzir a taxa de resfriamento e ajudar a moldar o contorno da solda (LIENERT, 2011).

Durante a soldagem, o calor do arco derrete parte do fluxo junto com a ponta do eletrodo alimentado continuamente, conforme ilustrado na Figura 4. A ponta do eletrodo e a zona de soldagem são circundados e protegidos por fluxo fundido coberto por uma camada de fluxo não fundido. O eletrodo é mantido automaticamente a uma curta distância acima da peça de trabalho, com um arco entre o eletrodo e a peça de trabalho. Conforme o eletrodo avança ao longo da junta, o fluxo fundido mais leve sobe acima do metal fundido na forma de escória. A escória então congela sobre o metal de solda recém-solidificado, continuando a proteger o metal de possível contaminação por nitrogênio e oxigênio, enquanto em temperaturas elevadas. Após resfriar e remover qualquer fluxo não fundido para reutilização, a escória solidificada pode ser facilmente removida da solda (LIENERT, 2011).

Figura 4- Esquema do cordão de solda por arco submerso



Fonte: BARBOSA,2018

O que destaca a soldagem por arco submerso é o material granular (fluxo) que cobre a área de solda e evita que a radiação do arco, faíscas, respingos e fumaça escapem. É um processo estável, suave e possui cordões com acabamentos uniformes. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009)

Os equipamentos básicos desse processo podem ser observados na Figura 5. Sendo os principais: a fonte de energia, que é responsável por fornecer corrente, e pode ser do tipo tensão constante ou corrente constante; a tocha de soldagem, que é bico de contato deslizante que direciona a alimentação de arame e os fluxos de corrente elétrica para a poça de fusão; o alimentador de arame que é o suporte para a bobina de eletrodo; o alimentador de fluxo; e o sistema de controle que permite o ajuste dos diversos parâmetros de operação (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Figura 5 - Componentes básicos de soldagem por arco submerso



Fonte: FORTES,2004

Assim como em qualquer método de soldagem, os parâmetros do processo têm um efeito considerável nas características da solda. Então é crucial que seja feita uma seleção correta desses parâmetros, visto que eles podem afetar o tamanho do cordão, o formato do cordão, a profundidade de penetração e, às vezes, a composição química do metal depositado. (HOULDCROFT; HOULDCROFT, 1989; WEMAN, 2003)

Os parâmetros de soldagem por arco submerso são:

**Velocidade de soldagem:** variável que está relacionada com a penetração e largura do cordão de solda. Uma alta velocidade produz uma solda estreita com pouca penetração e pode causar uma fusão deficiente, já uma velocidade muito baixa resulta em uma superfície irregular e pode causar rachaduras térmicas. (TEICHMANN, 2016; WEMAN, 2003)

**Distância de contato/peça:** também conhecida como a extensão do eletrodo, é uma variável importante, pois controla a quantidade de aquecimento da resistência que ocorre no eletrodo. Se a extensão for curta, o efeito de aquecimento é pequeno e a penetração é profunda. Aumentar a extensão aumenta a temperatura do eletrodo, mas diminui a penetração, embora a taxa de deposição seja aumentada. A extensão aumentada é, portanto, útil em aplicações de revestimento (SILVA, 2016; HOULDCROFT; HOULDCROFT, 1989).

**Corrente de soldagem:** tem uma influência direta na taxa de deposição, penetração da junta e no formato interno e externo do cordão resultante. As soldas feitas com corrente excessivamente baixa tendem a ter pouca penetração e podem resultar em um arco menos estável. As soldas feitas em corrente excessivamente alta terão penetração profunda, alta diluição e um formato de cordão indesejável.

O tipo de corrente também pode influenciar, e nesse processo pode-se escolher entre três tipos de corrente, a corrente contínua de polaridade reversa CCPR(+), que oferece melhor resistência à porosidade e melhor formato do cordão de solda, a corrente contínua de polaridade direta CCPD(-) oferece uma taxa de deposição cerca de 30% superior à obtida com CCPR(+), mas produz menor penetração e pôr fim a corrente alternada, que proporciona penetração e taxa de deposição intermediária entre CCPR(+) e CCPD(-) (SENGUPTA 2017 ;WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

**Tensão do arco:** tem um efeito importante no formato do cordão de solda, elevando a tensão, produzindo um cordão mais largo e mais plano. O efeito da tensão do arco afeta a diluição ao invés da penetração. A tensão do arco deve ser cuidadosamente controlada, pois em altas tensões do arco, mais fluxo é fundido, permitindo que mais elementos de liga entrem no metal de solda, afetando a composição do metal de solda (SCHAEFFER, 2017; HOULDCROFT; HOULDCROFT, 1989).

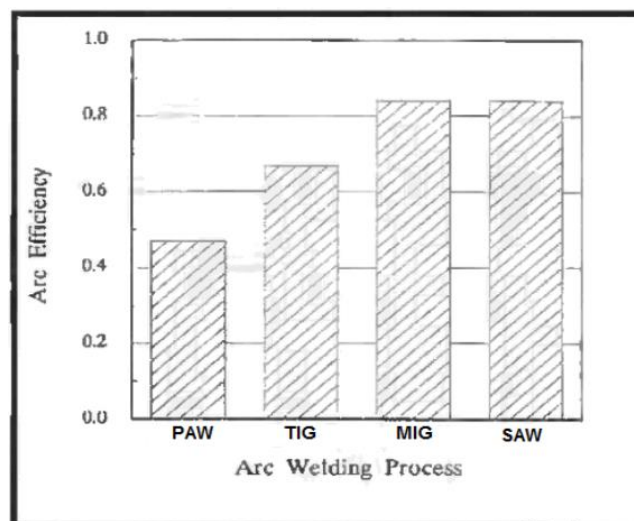
Diâmetro do eletrodo: a escolha do diâmetro do eletrodo deve ser bem avaliada, pois um fio de diâmetro menor, proporciona uma penetração mais profunda e um cordão de solda mais estreito do que um fio de diâmetro maior, devido ao efeito da concentração de corrente. (SCHAEFFER, 2017; HOULDCROFT; HOULDCROFT, 1989; WAINER; BRANDI; MELLO, 1992)

Comparando com outros processos de soldagem, a soldagem por arco submerso pode ser facilmente automatizada, atribuindo rapidez e economia ao processo e por isso é utilizada para várias aplicações industriais, visto que pode ser adequado para fabricações a larga escala. Além disso, também pode ser usada na manutenção e recuperação de peças, como também no revestimento de peças que necessitam de ligas com propriedades específicas como resistência a corrosão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009; WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

A comparação de processos de soldagem é conduzida através da energia de soldagem. Como a energia de soldagem depende do processo utilizado, os processos que utilizam eletrodo consumível como no caso do processo SAW (submerged arc welding) apresentam maiores rendimentos térmicos do que os processos que utilizam eletrodo não consumíveis, conforme apresentado na Figura 6.

Oliveira (2001) cita que a explicação sugerida por DuPont et al (1995) pelo menor rendimento apresentado pelo plasma em relação a SAW, se deve ao calor retirado do arco através do bocal constritor e sistema de refrigeração sempre presentes no processo plasma.

Figura 6 - Rendimento térmico do arco para os processos de soldagem



Fonte: (Adaptado de DuPont et al, 1995).

## 4 Materiais e Métodos

### 4.1 Materiais

Utilizou-se uma chapa de aço ARBL API 5L X70, com 19 mm de espessura como metal de base. Para preparação dos corpos de prova a chapa foi cortada nas dimensões (145 × 60 × 19) mm através do processo oxiacetileno. A liga de níquel, inconel 625, ER NiCrMo-3, na forma de arame maciço e na forma de pó, foi utilizada como metal de adição. As composições do metal de base e do metal de adição estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1: Composição química (% em massa) para aço ARBL API 5L X70

API 5L	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
X70	0,19	0,24	0,7	0,018	0,018	0,064	0,008	0,07

Fonte: O autor.

Tabela 2: Composição química (% em massa) para Inconel 625 (ER NiCrMo - 3)

ER NiCrMo - 3	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	Fe	Nb + Ta
	0,1	0,5	0,5	0,02	0,015	20 -30	8 - 10	58	0,4	0,5	0,4	3,82	3,15 – 4,15

Fonte: O autor.

### 4.2 Métodos

#### 4.2.1 Procedimentos de Soldagem

Os revestimentos depositados pelo processo de soldagem a Plasma Pó, utilizaram uma fonte de soldagem modelo DIGI Plus A7 800 fabricada pela IMC Soldagem conforme apresentada na Figura 7. contendo os seguintes acessórios: Fonte do tipo corrente contínua e tensão constante com capacidade de corrente máxima de 800 A, sistema de aquisição de dados para o monitoramento dos parâmetros de soldagem e tartilope para deslocamento linear da tocha.

Figura 7 - Fonte de soldagem para o processo PTA-P



Fonte: O autor.

Para os depósitos utilizando o processo de soldagem ao Arco Submerso (SAW), foi utilizado o metal de adição especificado na Tabela 2 e fluxo Ok Flux 10.16 que é um fluxo neutro, básico e aglomerado para soldagem ao Arco Submerso, especialmente para soldagem de revestimento com arames de ligas de níquel (Ni). Este fluxo é empregado principalmente em soldagem multipasse de materiais com elevada espessura.

A fonte de soldagem ilustrada na Figura 8 é do modelo DIGI Plus A7 400 fabricado pela IMC Soldagem, com fonte do tipo corrente contínua e tensão constante com capacidade de corrente máxima de 400 A.

Figura 8– Fonte de soldagem par ao processo por arco submerso.



Fonte: O autor.

#### 4.2.2 Planejamento Experimental

Para otimização dos experimentos da soldagem PTA-P foi utilizada a ferramenta estatística planejamento experimental completo  $2^3$ , com 3 experimentos no ponto central, totalizando 11 experimentos, conforme a tabela 3. Os experimentos foram realizados em ordem aleatória, para evitar o erro sistemático, variando-se simultaneamente as variáveis independentes. As análises de regressão dos dados experimentais foram interpretadas utilizando-se o software *Statistica 8* para estimar a resposta das variáveis dependentes.

Tabela 3 - Matriz de planejamento experimental  $2^3$  mais 3 pontos central.

Variáveis independentes			
Experimento	I (A)	Vs (cm/min)	Tx (g/min)
1	170	8	25
2	230	8	25
3	170	20	25
4	230	20	25
5	170	8	35
6	230	8	35
7	170	20	35
8	230	20	35
9	200	14	30
10	200	14	30
11	200	14	30

Fonte: O autor.

A tabela 4 apresenta os valores reais e codificados da matriz de planejamento. Cada variável independente foi investigada para um nível alto (+1) e baixo (-1). Os experimentos do ponto central (0) foram incluídos na matriz e na análise estatística, para identificar o efeito de cada variável em função das características geométricas, diluição e resistência à corrosão.



Tabela 4: 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	Vs	8	14	20
Taxa de alimentação	g/min	Tx	25	30	35

Fonte: O autor.

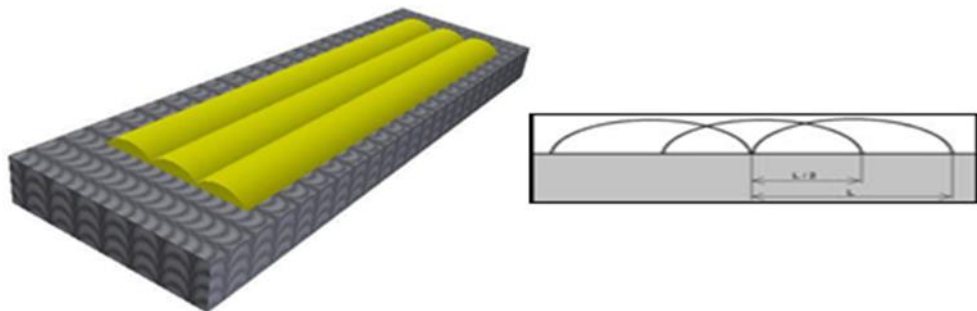
### 4.2.3 Depósito dos Revestimentos

#### 4.2.3.1 SOLDAGEM PTA-P

Para as deposições conduzidas pelo processo de soldagem PTA- P, os parâmetros de soldagem variados nos experimentos foram a corrente de soldagem (I), velocidade de soldagem (Vs) e taxa de alimentação de pó (Tx).

As deposições dos revestimentos foram realizadas na posição plana, utilizando eletrodo de tungstênio a 2% de óxido de tório (EWTh-2), com 3,1 mm de diâmetro e 1 mm de endentação. O ângulo da ponta do eletrodo foi mantido a 30 ° para todos os experimentos. A inclinação da tocha de soldagem foi de 90 ° em relação à horizontal, no sentido de "empurrar" da soldagem. Foi utilizada uma sobreposição de  $L / 2$  em relação à largura do primeiro cordão de solda, conforme ilustrada na Figura 9, mantendo sempre a temperatura de interpasse menor ou igual a 100 ° C.

Figura 9- Esquema do revestimento PTA-P com três passes com sobreposição 1/2



Fonte: O autor.

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

Tabela 5- Parâmetros mantidos constantes pelo Processo PTA

Recuo do Eletrodo	1 mm
Diâmetro do Bico Constritor	3,10 mm
Polaridade	Reversa (CC-)
Vazão do Gás de Proteção	10 L/min
Vazão do Gás de Plasma	2,2 L/min
Vazão do Gás de Arraste	3 L/min
DBP	20 mm
Ângulo de ataque	90°

Fonte: O autor.

Após a deposição dos revestimentos pelo processo PTA-P, foram calculadas as energias de soldagem para cada experimento através da Equação 1, utilizando os valores de corrente obtidos para cada depósitos, juntamente com parâmetros utilizados na Tabela 5, e adotando um rendimento térmico ( $\eta$ ) de 0,43 para o processo PTA-P.

$$H = \eta \frac{VI}{1000 \times v_s} \times 60 \quad (1)$$

onde:

H=Energia de soldagem;

$\eta$ = rendimento térmico;

V = tensão de soldagem (V);

I = corrente de soldagem (A);

$v_s$  = velocidade de soldagem(cm/min).

Para utilização dos níveis máximo e mínimo, de energia de soldagem obtidos na deposição por soldagem PTA-P, nos depósitos por SAW, foi necessário calcular os níveis de velocidade de soldagem através da Equação 1, utilizando as correntes de soldagem, 170 A e 230 A, que proporcionaram o maior e o menor, 12 KJ/cm e 8 KJ/cm, energia de soldagem, adotando um rendimento térmico de 0,87 (DuPont et al, 1995)

#### 4.2.3.2 SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO

Para deposição por arco submerso, SAW, utilizou-se os valores da corrente de soldagem 170 A e 230 A, o qual proporcionou o maior e o menor resultado da energia de soldagem, ou seja, 12 kJ/cm e 8 kJ/cm, provenientes dos depósitos realizados pelo processo de soldagem PTA-P, que proporcionaram as seguintes velocidades de soldagem 18 m/min e 40 m/min, respectivamente. Esses valores maior e menor da energia de soldagem também proporcionaram o maior e menor valor da diluição no revestimento depositado.

Os parâmetros adotados para realização dos depósitos por soldagem SAW estão apresentados na Tabela 6, e foram baseados nos parâmetros utilizados no processo PTA-P.

Tabela 6- Parâmetros mantidos constantes pelo Processo SAW

Parâmetros	Unidade	Notação	Nível	
			Mínimo	Máximo
Corrente	A	I	170	230
Velocidade de soldagem	m/min	Vs	18	40
Velocidade de alimentação	g/min	Tx	8	11

Fonte: O autor.

Para deposição das camadas de revestimentos alguns parâmetros de soldagem foram mantidos constantes, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7- Parâmetros mantidos constantes pelo Processo SAW

Sentido de soldagem	Empurrado
Posição de soldagem	Plana
Polaridade	reversa (CC+)
Gás de proteção	100% argônio
Vazão do Gás de Proteção	10 L/min
DBCP	20 mm
Ângulo de ataque	75°

Fonte: O autor.

## 4.2.4 Preparação Metalográfica

### 4.2.4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E CÁLCULO DA DILUIÇÃO

As amostras foram obtidas por corte transversal, que foi realizado através da cortadeira metalográfica ilustrada através da Figura 10. Após o corte, os corpos de prova foram submetidos à preparação metalográfica, o qual foram lixados com lixas com (granulação de 80, 100, 180, 220, 320, 400, 600, 800 e 1000 até 1200  $\mu\text{m}$ ), utilizando uma lixadeira, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Cortadeira



Fonte: O autor.

Em seguida os mesmos foram submetidos à polimento, em politriz, conforme ilustrado na Figura 11, em disco de pano com alumina 4 ( $1\mu\text{m}$ ), 3 ( $0,3\mu\text{m}$ ) e 2 ( $0,05\mu\text{m}$ ), para avaliação geométrica e cálculo da diluição.

Figura 11 - Lixadeira e Politriz



Fonte: O autor.

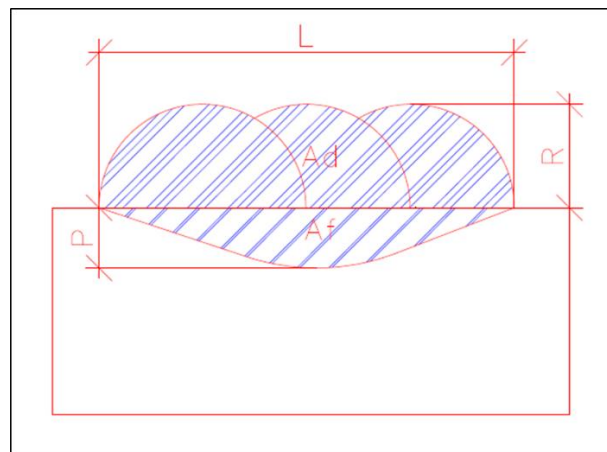
Foram avaliadas as características geométricas (largura e reforço), utilizando um

paquímetro para as medições. Foi utilizada a média aritmética de três medições de cada uma das características geométricas. Enquanto, para o cálculo da diluição, foi utilizado o software *Image tool*.

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 a área do metal depositado, conforme a Equação 2 e ilustrada na Figura 12. A figura 12 também apresenta a representação esquemática da área do cordão de solda, indicando a largura (L), reforço (R), penetração (P), área da zona fundida ( $A_f$ ), área do metal depositado ( $A_d$ ).

$$D (\%) = \frac{A_f}{A_f + A_d} \times 100 \quad (2)$$

Figura 12 - Representação esquemática da seção transversal do revestimento soldado



Fonte: O autor.

#### 4.2.5 Análise Química

As superfícies dos revestimentos foram submetidas a análise de composição química utilizando o EDX - Energy Dispersive X-ray (Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio X) em pontos nas seções planificadas dos revestimentos, ou seja, na região que seria submetida à análise de corrosão, para avaliar o percentual de Fe.

#### 4.2.6 Análise de Corrosão

Para realização dos ensaios eletroquímicos foi utilizada uma célula eletroquímica composta de três eletrodos com 50 ml de NaCl. Um eletrodo de calomelano saturado ( $Hg/Hg_2Cl_2$ ) como eletrodo de referência, um eletrodo de folha de platina como contra eletrodo

e um eletrodo de aço ARBL API 5L X70 revestido com a liga inonel 625 como eletrodo de trabalho.

No estudo de corrosão foi utilizado as medidas de Polarização Potenciodinâmica Linear (PPL), para isso foi utilizado postentostato/galvanostato Autolab PG STATE 30. Para a coleta dos dados e tratamento dos resultados foi utilizado um computador com Software GPES para as medidas de PLP. As curvas de PPL foram obtidas com uma taxa de varredura de 1 mV s-1.

## 5 Resultados

### 5.1 Análise dos revestimentos depositados por soldagem PTA-P

A Tabela 8 apresenta os valores da diluição (D%), teor de ferro (%Fe) e as medidas eletroquímicas de corrosão: potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), resistência à polarização do material ( $R_p$ ) e corrente de corrosão ( $i_{corr}$ ).

Tabela 8- Matriz de planejamento fatorial  $2^3$  e resultados obtidos das variáveis dependentes.

Exp.	Variáveis Independentes			Variáveis Dependentes				
	I (A)	Vs (cm/min)	Tx (g/min)	D (%)	Fe (%)	$E_{corr}$ (V)	$R_p$ (K $\Omega$ )	$i_{corr}$ (A)
1	170	8	25	4,66	3,64	-0,562	486,95	5,7
2	230	8	25	13,37	10,62	-0,608	344,3	18,05
3	170	20	25	4,69	3,96	-0,572	407,45	6,69
4	230	20	25	17,8	13,18	-0,639	309,23	21,54
5	170	8	35	6,49	4,73	-0,578	364,91	7,31
6	230	8	35	16,52	12,88	-0,627	324,58	21,17
7	170	20	35	4,69	3,89	-0,565	444,12	5,79
8	230	20	35	20,09	15,84	-0,643	215,44	26,84
9	200	14	30	10,2	7,97	-0,601	346,99	13,32
10	200	14	30	10,25	8,27	-0,606	344,3	13,39
11	200	14	30	10,17	6,94	-0,591	338,99	13,28

Fonte: O autor.

Conforme os valores apresentados na Tabela 8 verifica-se que os experimentos: 1, 3, 5 e 7 apresentaram os menores percentuais dos valores da diluição e nos teores de ferro que as demais condições de soldagem, sendo o Exp. 1 o que apresentou o menor valor. Assim, esses

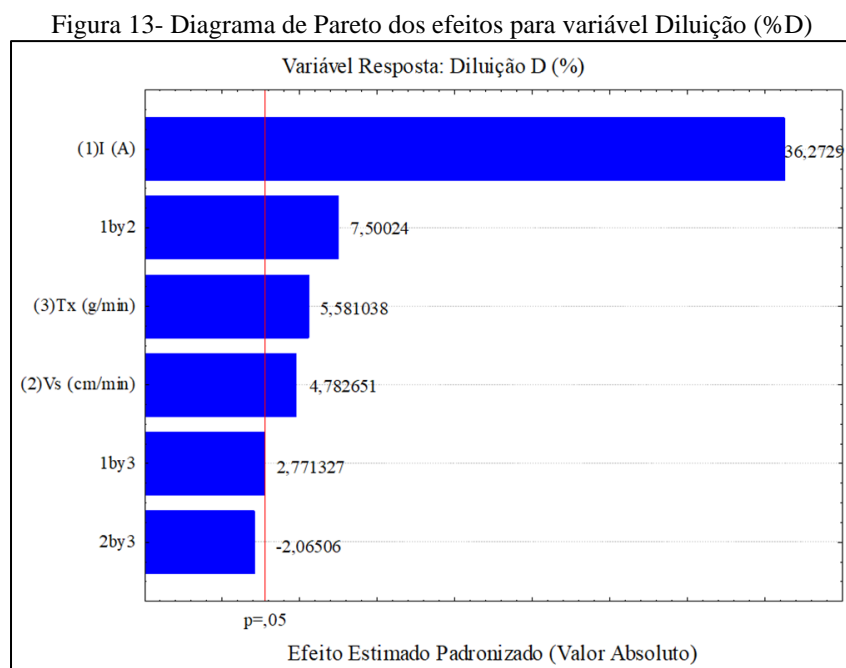
revestimentos são mais resistentes à corrosão, pois apresentaram as menores corrente de corrosão, que está intimamente ligada a dissolução do material, ou seja, do revestimento depositado. Resultados semelhantes foram encontrados na literatura, quando foram usados valores de corrente e velocidade maiores de soldagem utilizando o a soldagem PTA-P (SANTOS,2014). Por outro lado, o experimento 8 apresentou o maior percentual em termos dos valores da diluição e teor de ferro, implicando na menor resistência à corrosão, pois apresentou a maior corrente de corrosão, conseqüentemente acarretará na maior dissolução do revestimento.

## 5.2 Análise Estatística

Através do planejamento experimental fatorial completo, foram analisados o efeito da significância estatística das variáveis independentes: corrente de soldagem (I), velocidade de soldagem (Vs) e taxa de alimentação (Tx) nos resultados e suas interações.

Os diagramas de Pareto obtidos para cada variável dependente são apresentados nas Figuras 13, 14, 15 ,16 e 17. Pode-se notar que todos os efeitos considerados têm influência nas respostas (D%), teor de ferro (%Fe), potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), resistência à polarização do material ( $R_p$ ) e corrente de corrosão ( $i_{corr}$ ).

A Figura 13 ilustra que as estimativas de efeito linear para o percentual de diluição têm uma influência estatisticamente significativa da corrente de soldagem, I, velocidade de soldagem, Vs, e a taxa de alimentação, Tx. Além disso, interação da corrente de soldagem e da velocidade se soldagem ( $I*Vs$ ) são significativas.



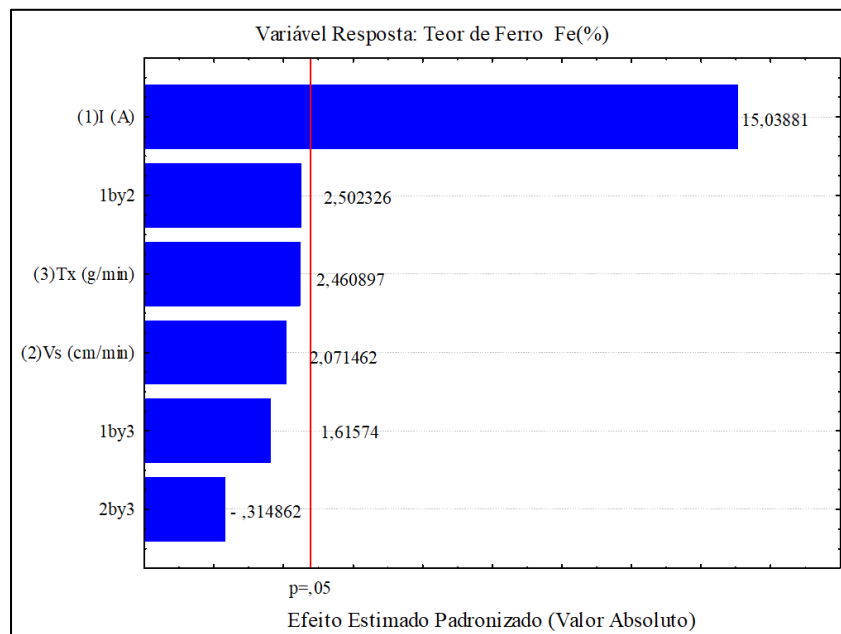
Fonte: O autor.

Portanto, a corrente de soldagem foi o parâmetro de maior significância estatística para a variável diluição. O valor positivo da barra horizontal apresentado no gráfico de Pareto, indica que quanto maior for à corrente de soldagem maior será a diluição, pois uma maior corrente de soldagem implica num aumento no calor de entrada na área fundida da poça de fusão.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 8, os valores de teor de ferro ficaram entre 3,64% e 15,84%. Também observar-se que a diluição é diretamente proporcional a quantidade de ferro na amostra, visto que a diluição é o percentual do metal de base que se dissolve junto ao metal de adição, logo para a menor diluição temos a menor quantidade de ferro.

O gráfico de Pareto apresentado na Figura 14, indica que a corrente de soldagem, I, é o único efeito estatisticamente significativo para variável teor de ferro, estando com o sinal na barra horizontal positivo do diagrama de Pareto, isto é, o maior teor de ferro é atingido para maiores valores da corrente de soldagem.

Figura 24 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável Teor de Ferro (% Fe)

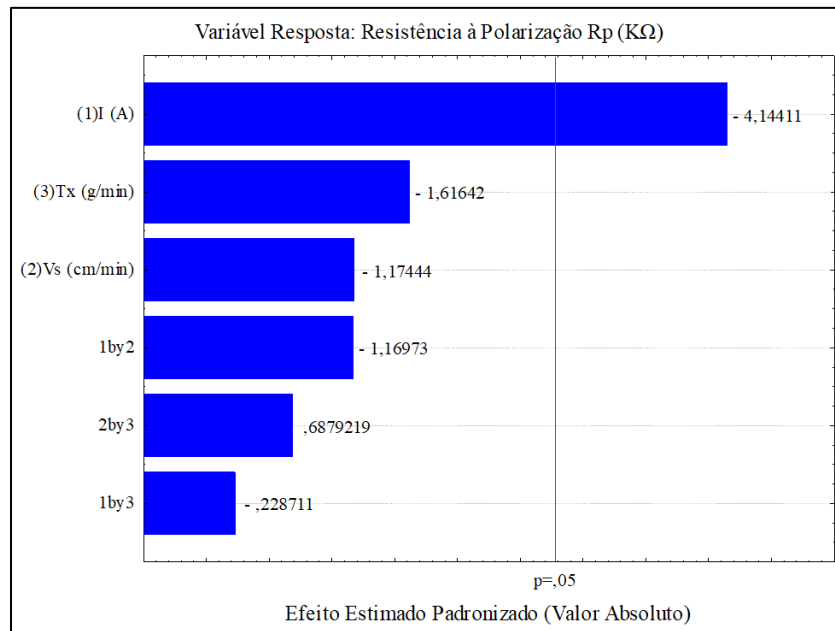


Fonte: O autor.

A Figura 15 apresenta que a corrente de soldagem, I, é o único efeito estatisticamente significativo para a variável resistência à polarização, estando com o sinal na barra negativo do diagrama de Pareto, isto significa que a maior resistência à polarização é atingida para menores valores da corrente de soldagem. Quanto menor a corrente de soldagem, menor a diluição e conseqüentemente o aumento das propriedades anticorrosivas. Através da Tabela 8 verificou-se que os valores da resistência à polarização ( $R_p$ ) variaram de 215,44  $K\Omega$  a 486,95  $K\Omega$ .

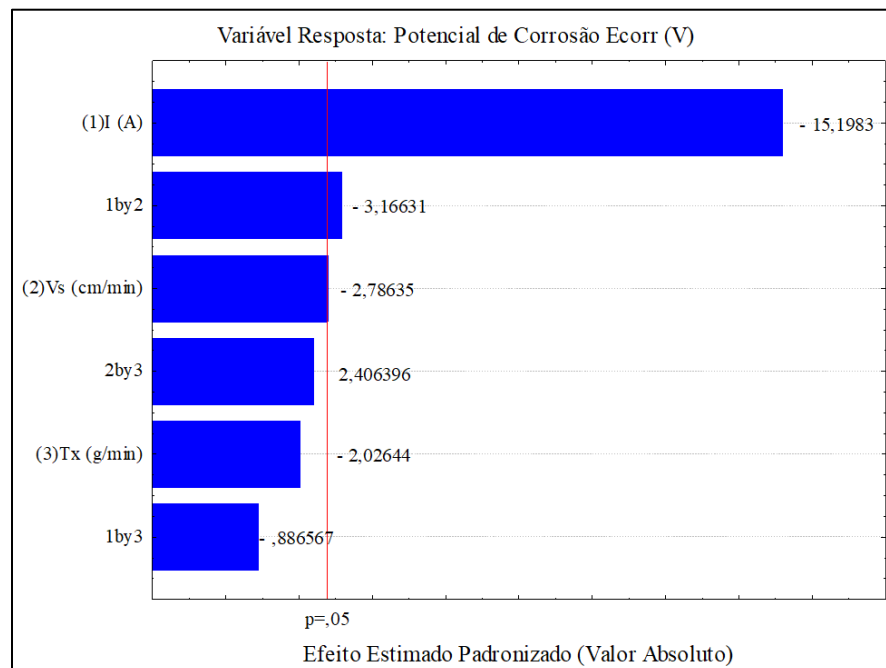


Figura 35- Diagrama de Pareto dos efeitos para variável Resistência a Polarização (Rp)



Fonte: O autor.

Observou-se através do diagrama de Pareto da figura 16, que a corrente de soldagem, I, é a variável com maior efeito estatisticamente significativo para a variável potencial de corrosão, estando com valor na barra negativo, isto é, indica que o  $E_{corr}$  diminui com a elevação da corrente de soldagem. Na Tabela 8 observou-se que os valores do potencial de corrosão variaram entre - 0,643 V a - 0,562 V.

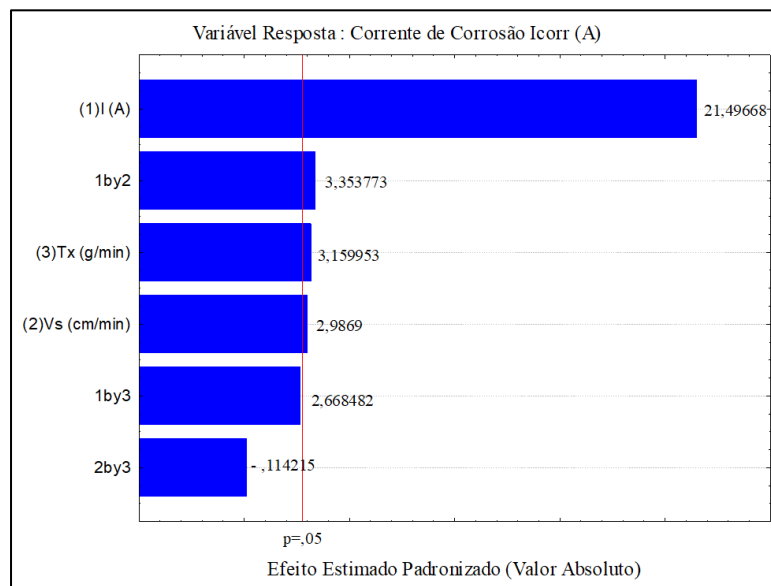
Figura 4- Diagrama de Pareto dos efeitos para variável Potencial de Corrosão ( $E_{corr}$ )

Fonte: O autor.

A corrente de corrosão é uma medida direta da velocidade de corrosão, ou seja, quando maior o valor da corrente de corrosão, mais rápido ocorre o fenômeno da corrosão.

Através do diagrama de Pareto da figura 17, observa-se que a corrente de soldagem, I, é a variável com maior efeito estatisticamente significativo para variável corrente de corrosão, estando com valor na barra horizontal positivo, isto é, indica que a  $I_{corr}$  aumenta com a elevação da corrente de soldagem. Na Tabela 8, os valores da corrente de corrosão apresentados, ficaram entre 5,7 A e 26,86A.

Figura 5- Diagrama de Pareto dos efeitos para variável Corrente de Corrosão ( $I_{corr}$ )



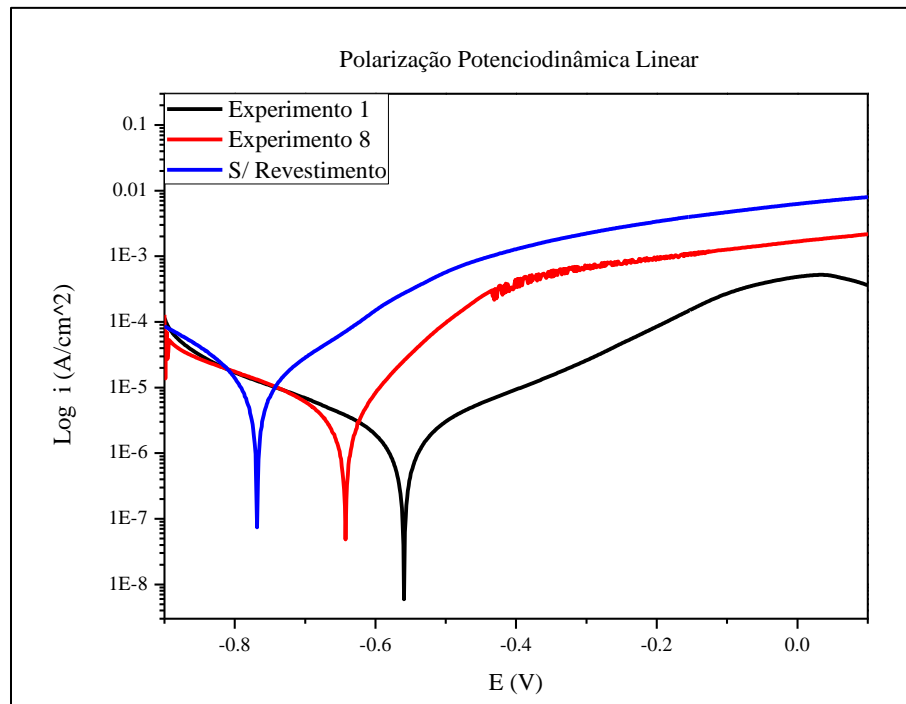
Fonte: O autor.

### 5.3 Análises de Corrosão

Para avaliação da resistência à corrosão dos revestimentos depositados por PTA-P foram feitas medidas eletroquímicas de corrosão através da técnica de Polarização Potenciodinâmica Linear (PPL).

A Figura 18 apresenta as curvas de polarização potenciodinâmica linear do revestimento do experimento 1 que apresentou a menor diluição (4,66%), e do experimento 8 que apresentou a maior diluição (20,07%), como também a curva de polarização potenciodinâmica linear do aço ARBL API 5L X70 sem revestimento. Assim, o experimento 1 com menor percentual de diluição, apresentou potencial de corrosão mais positivo que a do experimento 8 com maior percentual de diluição, onde indicou maiores propriedades anticorrosivas. Além disso, observou-se que mesmo o experimento 8 apresentando um percentual de diluição maior, tem propriedades anticorrosivas melhores que a do aço ARBL API 5L X70 sem revestimento. Tais resultados são coerentes aos resultados encontrados por (SILVA, 2013; BATISTA, 2011).

Figura 6 - Curva de polarização dos experimentos 1, 8 e do aço ARBL API 5L X70 sem revestimento.



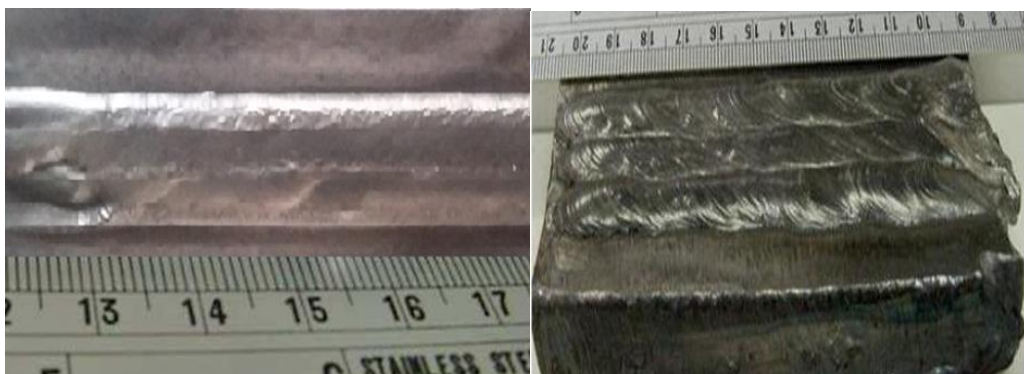
Fonte: O autor.

## 5.4 Análise comparativa dos revestimentos depositados por soldagem PTA-P e SAW

### 5.4.1 Caracterização geral

A Figura 19 apresenta o aspecto externo dos cordões onde é possível observar diferenças significativas entre eles. O processo PTA-P foi o que produziu o melhor acabamento superficial, menor diluição, melhor molhamento e maior largura.

Figura 7- Aspecto superficial dos depósitos por: a) PTA-P e b) SAW



a) PTA-P

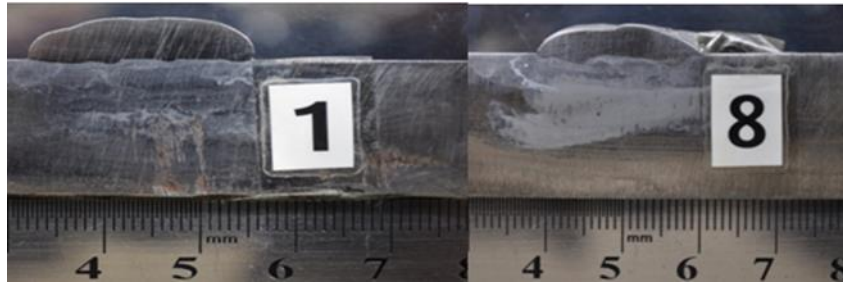
b) SAW

Fonte: O autor.

As Figuras 19 e 20 ilustram a seção transversal dos cordões obtidos pelos dois processos (PTA-P e SAW) onde é possível observar diferenças significativas no perfil de penetração dos

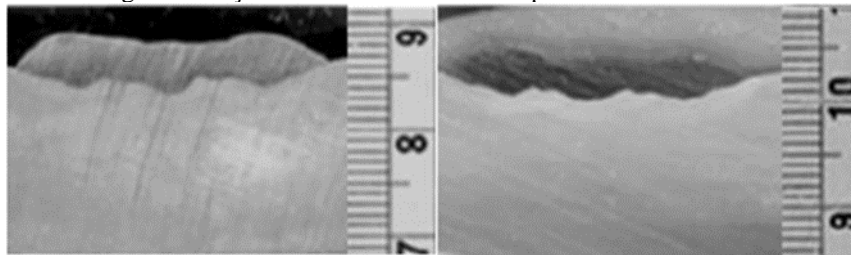
cordões. Quando comparados os depósitos realizados através dos dois processos com a mesma faixa de energia de soldagem, pode-se observar na Figura 20 que a penetração é sempre menor nos revestimentos depositados por soldagem PTA-P. Por outro lado, na Figura 21 verifica-se que nos revestimentos aplicados por SAW apresentam maior penetração, implicando em maiores percentuais de diluição, conseqüentemente diminuindo a resistência a corrosão.

Figura 20- Seção transversal dos cordões processados via PTA-P



Fonte: O autor.

Figura 8- Seção transversal dos cordões processados via SAW



Fonte: O autor.

#### 5.4.2 Avaliação da Resistência à Corrosão

A Tabela 9 exibe os resultados dos experimentos 1 e 8 referentes aos revestimentos depositados por soldagem PTA-P e dos experimentos referentes aos revestimentos depositados por soldagem SAW nas mesmas condições de energia de soldagem PTA-P, para efeitos de comparação na análise das medidas eletroquímica de corrosão.

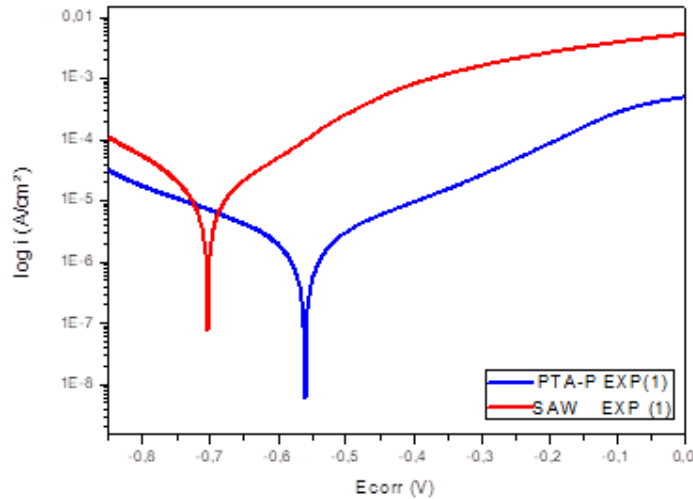
Tabela 9- Resultados dos experimentos das soldagens PTA-P e SAW

Experimento	H (kJ/cm)	D (%)	Fe (%)	$E_{corr}$ (V)	$R_p$ (K $\Omega$ )	$i_{corr}$ (A)
PTA-P 1	8,0	4,66	3,64	-0,562	486,95	5,7
PTA-P 8	12,0	20,09	15,84	-0,643	215,44	26,84
SAW 1	8,0	8,58	7,55	-0,704	368,15	8,78
SAW 8	12,0	32,78	27,89	-0,720	198,10	31,15

Fonte: O autor.

A Figura 22 apresenta as curvas de Polarização Potenciodinâmica Linear (PPL) dos valores obtidos dos revestimentos aplicados por soldagem PTA-P e SAW com o mesmo valor de energia de soldagem igual a 8 kJ/cm, que proporcionaram nível de diluição igual a 4,66 % (PTA-P) e 8,58 % (SAW), e teor de ferro de 3,64% (PTA-P) e 7,55% (SAW).

Figura 9- Curva de Polarização Potenciodinâmica, revestimento depositado com H= 8 kJ/cm

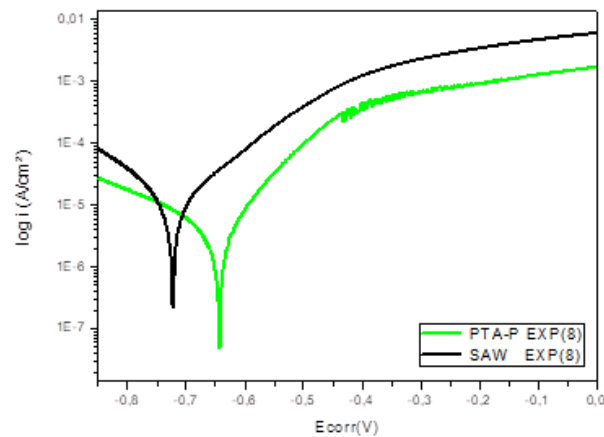


Fonte: O autor.

Nota-se através da Figura 22 que a curva do experimento 1 obtida por soldagem PTA-P desloca o potencial de corrosão para potenciais mais positivos quando comparado a curva do revestimento do experimento 1 depositado por soldagem SAW. Este deslocamento para direita representa que quanto mais positivo for o potencial de corrosão aplicado, mais retardado será o início do ramo anódico da curva de polarização, ou seja, mais lento o início da corrosão. Os resultados da corrente de corrosão,  $i_{corr}$ , apresentados na Tabela 9, também indicam que quanto menor for valor da corrente, menor será a dissolução do revestimento (SILVA, 2013; SANTOS, 2014).

A Figura 23 apresenta as curvas de Polarização Potenciodinâmica Linear (PPL) do experimento 8 para PTA-P e SAW, revestimentos estes aplicados com uma energia de soldagem igual a 12 KJ/cm, e com nível de diluição 20,09 % (PTA-P) e 32,78% (SAW), e teor de ferro de 15,84% (PTA-P) e 27,89% (SAW).

Figura 10- Curva de Polarização Potenciodinâmica, revestimento depositado com H= 12kJ/cm



Fonte: O autor.

Nota-se através do gráfico da Figura 22 que o comportamento das curvas de Polarização Potenciodinâmica Linear do experimento 8 por soldagem PTA-P e do experimento 8 depositado por soldagem SAW, foram similares ao comportamento dos revestimentos apresentados no gráfico da Figura 22.

Portanto, para a avaliação da corrosão em mesmo nível de energia imposto, verificou-se que os experimentos com menor percentual de diluição e teor de ferro, são menos susceptível a corrosão, sendo assim o teor de ferro principal responsável para início da corrosão.

## 6 Conclusão

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

- A ferramenta estatística planejamento experimental utilizada, foi eficaz encontrar os melhores parâmetros de soldagem para a obtenção de cordões de solda adequados para a aplicação dos revestimentos;
- Os menores valores teor de ferro e diluição demonstraram a eficiência deste processo para aplicação de revestimentos contra corrosão, tanto no processo PTA-P quanto no processo SAW;
- O processo PTA-P apresentou melhor acabamento superficial, menor diluição, melhor molhamento e maior largura, com isso, mostrou-se mais eficaz para a resistência a corrosão;
- Os revestimentos aplicados por SAW apresentam maior penetração, implicando em maiores percentuais de diluição, diminuindo a resistência a corrosão;
- Ambos os processos são eficientes para ser utilizado para revestimento em aços, visto que o aço sem revestimento apresenta uma corrosão mais acelerada.

## Referências

- ALIZADEH, M.; BORDBAR, S. The influence of microstructure on the protective properties of the corrosion product layer generated on the welded API X70 steel in chloride solution. **Corrosion Science**, v. 70, p. 170–179, may 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/257086640\\_Effects\\_of\\_microstructure\\_alteration\\_on\\_corrosion\\_behavior\\_of\\_welded\\_joint\\_in\\_API\\_X70\\_pipeline\\_steel](https://www.researchgate.net/publication/257086640_Effects_of_microstructure_alteration_on_corrosion_behavior_of_welded_joint_in_API_X70_pipeline_steel). Acesso em: 15 set. 2021.
- ALVES, J. A. **Desenvolvimento de um sistema de alimentação de consumíveis em pó para soldagem PTA-P com capacidade para manipulação e transporte em oposição à gravidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)—Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/95651>. Acesso em: 27 nov. 2021.
- BAI, Y.; BAI, Q. **Subsea pipelines and risers**. 2nd ed. Oxford (GB): Elsevier, 2005.
- BARBOSA, L. H. S. **Propagação de trincas por fadiga na zona fundida de soldas obtidas em único passe com altíssima energia de soldagem através do processo SAW com adição de arame frio em um aço EH36**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica)—Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-B3EFSN>. Acesso: 15 set. 2021.
- BATISTA, V. RODRIGUES. **Influência dos parâmetros de soldagem sobre as características de revestimentos de liga de níquel aplicados em aços API 5L Gr B pelo processo arco submerso**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)—Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2011. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/1832>. Acesso em: 16 set. 2021.
- BEIDOKHTI, B.; DOLATI, A.; KOUKABI, A. H. Effects of alloying elements and microstructure on the susceptibility of the welded HSLA steel to hydrogen-induced cracking and sulphide stress cracking. **Materials Science and Engineering: A**, v. 507, n. 1–2, p. 167–173, maio 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509308013555>. Acesso em: 16 out. 2021.
- BOND, D.; BECKER, S. F.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Influência da corrente e granulometria do material de adição nos revestimentos processados por PTA. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 1, p. 53–61, mar. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/hfxWFfVZyNvqBR5PC5CZ8dP/?lang=pt>. Acesso em: 10 out. 2021.
- CORRIEU, J. M.; VERNOT-LOIER, C.; CORTIAL, F. Influence of heat treatments on corrosion behaviour of alloy 625 forged rod. *In: Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*, France, 1994. Disponível em: [http://www.tms.org/Superalloys/10.7449/1994/Superalloys\\_1994\\_795\\_806.pdf](http://www.tms.org/Superalloys/10.7449/1994/Superalloys_1994_795_806.pdf). Acesso em: 23 out. 2021.
- DAVIS, J., **Hard facing, weld cladding, and dissimilar metal joining. Welding, Brazing Solder.**, 10a ed., Ohio, 1993.

DAVIS, J.R.; Nickel, cobalt, and their alloys: ASM specialty handbook. **Materials Park**, 1a ed, Ohio, 2000.

DÍAZ, V. V.; DUTRA, J. C.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Deposição por plasma com arco transferido. **Soldagem & Inspeção**, v. 15, n. 1, p. 41–51, mar. 2010.

DUPONT, J. N. et al. Thermal efficiency of arc welding processes. **Welding Journal-Including Welding Research Supplement**, v. 74, n. 12, p. 406s, 1995. Disponível em: [http://files.aws.org/wj/supplement/WJ\\_1995\\_12\\_s406.pdf](http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1995_12_s406.pdf). Acesso em: 10 out. 2021.

FLOREEN, Stephen et al. The metallurgy of alloy 625. **Superalloys**, v. 718, n. 625, p. 13-37, 1994. Disponível em: [https://www.tms.org/Superalloys/10.7449/1994/Superalloys\\_1994\\_13\\_37.pdf](https://www.tms.org/Superalloys/10.7449/1994/Superalloys_1994_13_37.pdf). Acesso em: 16 out. 2021.

FORTES, Cleber. **Apostila arco submerso**. ESAB. 2004. Disponível em: [https://esab.com/index.cfm/\\_api/render/file/?method=inline&fileID=68764649-FAC0-497B-B60F3029CE3042AE](https://esab.com/index.cfm/_api/render/file/?method=inline&fileID=68764649-FAC0-497B-B60F3029CE3042AE). Acesso: 25 set.2021.

HOULDCROFT, Peter Thomas. **Submerged-arc welding**. Woodhead publishing, England, 1990. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=ZdLMA3w\\_ZXEC&oi=fnd&pg=PA7&dq=HOULDCROFT,+Peter+Thomas.+Submerged-arc+welding.+Woodhead+publishing,+1989.+&ots=LvDZn0SIYJ&sig=ChKIBEMsbXW7LW3RDvNYCOJpPSw#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=ZdLMA3w_ZXEC&oi=fnd&pg=PA7&dq=HOULDCROFT,+Peter+Thomas.+Submerged-arc+welding.+Woodhead+publishing,+1989.+&ots=LvDZn0SIYJ&sig=ChKIBEMsbXW7LW3RDvNYCOJpPSw#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 10 set. 2021.

HIPPERT JUNIOR, E. **Investigação experimental do comportamento dúctil de aços API-X70 e aplicação de curvas de resistência J-Δa para previsão de colapso em dutos**. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica) —Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em : <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-08092004-114717/pt-br.php> . Acesso em: 15 set. 2021.

KOU, H. et al. Theoretical prediction of the temperature-dependent yield strength of solid solution strengthening Nickel-based alloys. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 140, p. 83–92, maio 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0020740317334768>. Acesso em: 17 out. 2021.

LIGANG, L. et al. Evaluation of the fracture toughness of X70 pipeline steel with ferrite-bainite microstructure. **Materials Science and Engineering: A**, v. 688, p. 388–395, mar. 2017. Disponível em : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509317300527>. Acesso: 25 out. 2021.

LIENERT, T. J. et al. **Welding Fundamentals and Processes**. 1 ed. Russell Township, Ohio:ASM International, 2011. 891 p. v. 06A.

MARQUES, Paulo Villani. **Soldagem-fundamentos e tecnologia**. Editora UFMG, 2009.

MASOUMI, M.; SILVA, C. C.; DE ABREU, H. F. G. Effect of crystallographic orientations on the hydrogen-induced cracking resistance improvement of API 5L X70 pipeline steel under various thermomechanical processing. **Corrosion Science**, v. 111, p. 121–131, out. 2016. Disponível em:



<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010938X16302050>. Acesso: 25 out. 2021.

MOHTADI-BONAB, M. A. et al. The mechanism of failure by hydrogen induced cracking in an acidic environment for API 5L X70 pipeline steel. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 2, p. 1096–1107, jan. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036031991403136X>. Acesso em: 25 set. 2021.

MOHTADI-BONAB, M. A.; SZPUNAR, J. A.; RAZAVI-TOUSI, S. S. A comparative study of hydrogen induced cracking behavior in API 5L X60 and X70 pipeline steels. **Engineering Failure Analysis**, v. 33, p. 163–175, out. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630713001647>. Acesso em: 25 out. 2021.

OLIVEIRA, M. A. DE. **Estudo da soldagem plasma com alimentação automática de arame para aplicação em revestimentos metálicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) —Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/81950>. Acesso em: 25 out. 2021.

OLIVEIRA, M. M. DE. **Efeito da nitretação a plasma no comportamento mecânico do Inconel 625 em temperaturas elevadas**. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Materiais) —Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-23022018-092059/en.php>. Acesso em: 17 set. 2021.

ÖZEL, C.; GÜRGENÇ, T. Effect of heat input on microstructure, wear and friction behaviour of (wt. -%) 50FeCrC-20FeW-30FeB coating on AISI 1020 produced by using PTA welding. **PLOS ONE**, v. 13, n. 1, p. e0190243, 11 jan. 2018. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0190243>. Acesso em: 15 out. 2021.

RAMOS, L. B. **Resistência à corrosão e morfologia de junta soldada de inconel 625**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) —Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/178367> Acesso em :15 out. 2021.

SANTOS, A. X. DOS. **Avaliação da resistência à corrosão de revestimento à base de inconel 625 utilizando os processos de soldagem MIG e plasma pó**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) —Paraíba: Universidade Federal de Campina Grande, 2014. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/2818>. Acesso em: 15 out. 2021.

SANTOS, A. X. DOS; MACIEL, T. M.; SANTANA, R. A. C. DE. Avaliação de revestimentos à base de inconel 625 depositados através do processo de soldagem gmaw em aço api 5l x70 utilizando planejamento fatorial. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, v. 34, n. 3, p. 128, 30 ago. 2015. Disponível em: <http://www.sbvacu.org.br/rbav/index.php/rbav/article/view/995>. Acesso em: 16 out. 2021.

SCHAEFFER, C. M. **Adequação do procedimento de soldagem por arco submerso para o revestimento com arame inconel 625**. Dissertação (Mestrado em Mecatrônica) —Instituto

Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em:  
<https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/566>. Acesso em: 25 set. 2021.

SENGUPTA, V.; MENDEZ, P. F. Effect of current on metal transfer in SAW Part 1: DCEP. **Welding Journal**, v. 96, n. 7, 2017. Disponível em: c  
[https://www.researchgate.net/publication/318886590\\_Effect\\_of\\_current\\_on\\_metal\\_transfer\\_in\\_SAW\\_Part\\_1\\_DCEP](https://www.researchgate.net/publication/318886590_Effect_of_current_on_metal_transfer_in_SAW_Part_1_DCEP). Acesso em: 25 out. 2021.

SICILIANO, F. Materiais para gasodutos: aços de alta resistência para dutos de transporte de gás e petróleo - tendências atuais. **Metalurgia & Materiais**. São Paulo: v. 64, Nº. 588, 2008, p. 208 – 211. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21065190>. Acesso em: 24 set. 2021.

SHOEMAKER, Lewis E. Alloys 625 and 725: trends in properties and applications. **Superalloys**, v. 718, n. 625, p. 409-418, 2005. Disponível em: [https://www.tms.org/Superalloys/10.7449/2005/Superalloys\\_2005\\_409\\_418.pdf](https://www.tms.org/Superalloys/10.7449/2005/Superalloys_2005_409_418.pdf). Acesso em: 16 out. 2021.

SILVA, M. M. DA. **Avaliação da compatibilidade metalúrgica e da resistência à corrosão de revestimentos da liga AWS ER NiCrMo-4 aplicados por soldagem SAW sobre o aço API 5L Gr B**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) —Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2013. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/7219> em: 16 set. 2021.

SILVA, M. M. DA et al. Otimização de Parâmetros do Processo de Soldagem Arco Submerso para Revestimentos Anticorrosivos. **Soldagem & Inspeção**, v. 21, n. 1, p. 115–124, mar. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/TPhWKnnxpJnyGgCsgf3LjXH/abstract/?stop=next&format=html&lang=pt>. Acesso em: 17 out. 2021.

SILVA, R. H. G. E; DUTRA, J. C. Processo PTA-P - uma revisão da literatura como base para inovações. Parte 1 de 2: elementos construtivos. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, n. 1, p. 76–85, mar. 2012a. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/TFp7RnDDmhBhhV3nx4Bjvgy/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 24 set. 2021.

SILVA, R. H. G. E; DUTRA, J. C. 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**, v. 17, n. 2, p. 173–183, jun. 2012b. Disponível em : <https://www.scielo.br/j/si/a/zNBZhnH6qQGBZ8GZcFh6VbR/?format=html&lang=pt&stop=next>. Acesso em: 15 out. 2021.

SOUSA, I. S. **A influência do tratamento térmico de envelhecimento na dureza da superliga de níquel inconel 625**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) —Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009. Disponível em: [https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2009-2\\_pg-igor\\_e\\_rafa.pdf](https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2009-2_pg-igor_e_rafa.pdf). Acesso em: 16 out. 2021.

SPECIAL METALS CORPORATION. **Inconel alloy 625**.2013. Disponível em:<https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-625.pdf>. Acesso em: 09 set. 2021

TEICHMANN, E. W. **Análise de variantes de processos de soldagem visando o revestimento com inconel 625 de tubos em aço API X46**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) —Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/172363>. Acesso em: 15 nov. 2021.

TIGRINHO, J. J.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Plasma transferred arc surface modification of a low carbon steel. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 17, p. 7554–7557, set. 2007. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-007-1615-9>. Acesso em: 17 out. 2021.

TURHAN, Şermin Özlem. **Fatigue behaviour of welded API 5L X70 pipeline steel**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Technical University, Middle East, 2020. Disponível em: <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/33307>. Acesso em: 10 set. 2021.

WAINER, Emilio, BRANDI, Sérgio Duarte e MELLO, Fabio Decourt Homem . **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgar Blücher. Acesso em: 10 nov. 2021. , 1992

WEMAN, Klas. **Welding processes handbook**. Elsevier. Philadelphia, 2011.

YIN, Z. F. et al. Electrochemical behaviour of Ni-base alloys exposed under oil/gas field environments. **Corrosion Science**, v. 51, n. 8, p. 1702–1706, ago. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010938X0900170X>. Acesso em: 14 out. 2021.