

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA METALÚRGICA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA SOLDAGEM**

**LUCIANA LIMA LOPES**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SOLDAGEM DE DIFERENTES CORPOS DE PROVAS  
DE AÇO INOX 316L ATRAVÉS DO PROCESSO DE SOLDAGEM GTAW ORBITAL  
AUTÓGENA**

**BELO HORIZONTE**

**2023**

Luciana Lima Lopes

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SOLDAGEM DE DIFERENTES CORPOS DE PROVAS  
DE AÇO INOX 316L ATRAVÉS DO PROCESSO DE SOLDAGEM GTAW ORBITAL  
AUTÓGENA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia da Soldagem.

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.

BELO HORIZONTE

2023

Lopes, Luciana Lima.

L864e            Estudo da influência da soldagem de diferentes corpos de  
provas de aço inox 316l através do processo de soldagem *gtaw* orbital  
autógena [recurso eletrônico] / Luciana Lima Lopes. – 2023.  
1 recurso online (58 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em  
Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais,  
como requisito para a obtenção do título de Especialista em Soldagem.

Bibliografia: f. 55-58.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Soldagem. 2. Metais – Soldabilidade. 3. Ligas de aço – Soldagem.  
4. Tubos de aço. I. Bracarense, Alexandre Queiroz. II. Universidade  
Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.791



Universidade Federal de Minas Gerais  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Programa de Pós-Graduação  
Curso de Especialização em Soldagem



## ATA 05ª/2023 DA DEFESA DE MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

No dia **23 de setembro de 2023**, às 08:00 h, a Comissão Examinadora se reuniu remotamente para avaliar o trabalho:

**Título:** *ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SOLDAGEM DE DIFERENTES CORPOS DE PROVAS DE AÇO INOX 316L ATRAVÉS DO PROCESSO DE SOLDAGEM GTAW ORBITAL AUTOGENA*

**Aluno:** LUCIANA LIMA LOPES– Matrícula: 2022687439

**Local:** Remotamente via plataforma “TEAMS”.

### Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante 50 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 50 minutos, é de parecer Favorável à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de 10 (dez) e com sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de 30 dias para efetuar-se a revisão final acompanhada e homologada pelo orientador Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense.

### Assinaturas:

Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense  
DEMEC/UFMG – Orientador

Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias  
DEMEC/UFMG - Avaliador

Prof. Dra. Annelise Zeemann do Pinho  
DEMEC/UFMG – Avaliador

Aluna: Luciana Lima Lopes

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho primeiramente à Deus, ao meu marido José Cristino que, sempre me incentivou e apoiou os meus desafios, a minha mãe Paulina e meus irmãos que sempre desejou e encorajou meus estudos.

## AGRADECIMENTOS

Gratidão a Deus por me guiar e iluminar desde a escolha do tema e durante toda preparação do trabalho.

Agradeço a minha família que sempre me apoiaram nos meus estudos, e em todos os momentos estavam dispostos a contribuir de todas as formas.

Ao meu marido que me incentivou e suportou em todos os momentos para que eu pudesse concluir esse trabalho.

Aos meus professores que dedicaram seu tempo para estar compartilhando conhecimento.

Aos meus colegas da pós-graduação, agradeço pelas parcerias, diálogos e compartilhamento das alegrias e angústias vivenciadas ao longo do curso.

A minha grande amiga Karine que me acolheu em sua casa com muito carinho nesse período de estudo, me deixando como se estivesse em casa, juntas compartilhamos conhecimento e vivência.

Sou muito grata ao grande elenco que contribuiu diretamente na construção nesse trabalho, Marcelo Monteiro, supervisor de produção, que em uma simples conversa me ajudou na construção do tema, ao Wagner Esteves supervisor de produção que, disponibilizou a área de soldagem de tubo para realizar os testes apresentados nesse trabalho. Fernando Ferreira, especialista operacional que realizou a soldagem dos corpos de prova, ao Marcelo Monteiro novamente, que não mediu esforços para disponibilizar a matéria-prima de diferentes fornecedores. Ao Claudio Moutinho, inspetor da qualidade que me suportou na inspeção e conferência do critério de aceitação dos corpos de prova soldados.

A Fabiene Natal, engenheira de processos especiais, que agregou e me apoio no detalhamento desse trabalho. Ao Rodrigo Stohler, engenheiro de processos especiais, que com muita paciência estava sempre disposto a contribuir com dicas e ideias agregando ao trabalho.

Ao Diego Tonnesen, gerente de engenharia de processos especiais, que me apoio no tema escolhido, demonstrando a importância para empresa.

Ao laboratório Tecmetal, nas pessoas do Henrique Fontes e Guilherme Zeeman com seu vasto conhecimento realizou os ensaios solicitados, e entendendo a importância do trabalho.

Presto meus agradecimentos ao prof. Alexandre Bracarense, pela disponibilidade em me orientar nesse trabalho e pelos seus valiosos ensinamentos em sala de aula.

## EPÍGRAFE

“Não existe vento favorável para o marinheiro que não sabe para onde ir.”

(Sêneca, filósofo e escritor romano)

## RESUMO

As indústrias petrolíferas são uma das mais importantes do mundo, uma vez que alimenta as principais matrizes energéticas, colabora na produção de bens essenciais em vários setores da economia, além disso, movimentam uma ampla cadeia produtiva e impulsionam o desenvolvimento tecnológico e a geração de empregos. As unidades de produção precisam operar as válvulas submarinas fazendo suas aberturas e fechamentos que controlam o fluxo da produção, as mesmas são administradas por um sistema de controle hidráulico onde as linhas são tubos de pequeno diâmetro, geralmente usam energia hidráulica, entregue a partir da superfície por um umbilical. A maioria dos desenvolvimentos submarinos também requer injeção de produtos químicos, por exemplo, para controlar a formação de parafina interna, incrustações, hidratos e corrosão. Em aplicações submarinas, o vazamento de fluidos de controle hidráulico e produtos químicos de tratamento muitas vezes é inaceitável tanto do ponto de vista ambiental como operacional. Consequentemente, uma técnica de união de alta confiabilidade é necessária para injeção hidráulica e química em tubulação de pequeno diâmetro e acessórios associados. O presente estudo tem por objetivo realizar o estudo da influência da soldagem de diferentes corpos de prova de aço inox 316L através do processo de soldagem GTAW orbital autógena. O trabalho se deu por meio de um estudo de caso em uma empresa X, utilizando tubos de aço inoxidável austenítico AISI 316L de diferentes fabricantes como corpos de prova, usando parâmetros específicos pré-definidos na especificação de procedimento de soldagem (EPS) de forma a mapear e entender os possíveis causadores da não repetibilidade do programa de soldagem, propondo melhorias no processo, tal como uma sistemática de trabalho. Foi realizada a caracterização metalográfica e ensaios mecânicos com objetivo de identificar qual característica na matéria-prima poderia estar contribuindo na necessidade de alteração da corrente de soldagem, além disso, análise do diagrama de Schaeffler, da composição química dos corpos de prova e dos resultados do heat input também foram essenciais para a elaboração dos resultados alcançados. Os resultados indicaram que, de fato, há diferença na soldabilidade de amostras de corpos de prova de diferentes fabricantes, evidenciando assim a complexidade do processo de soldagem de tubos de pequeno diâmetro e mostrando a importância do controle das matérias-primas utilizadas e da implementação de uma sistemática de trabalho. Desta forma, é imprescindível a separação da matéria-prima por fornecedor durante seu recebimento e manipulação na produção.

Palavras-chaves: aisi 316L; soldagem gtaw orbital autógena; eps; diferentes fabricantes de tubos de pequenos diâmetros.

## ABSTRACT

Oil industries are one of the most important in the world, since they feed the main energy matrixes, collaborate in the production of essential goods in various sectors of the economy, in addition, move a wide production chain, drive technological development, and job creation. Production units need to operate underwater valves by opening and closing them, which control the production flow. They are managed through a hydraulic control system where the lines are small diameter tubes, which receive cathodic protection when submerged and hydraulic fluids are non-corrosive. They usually use hydraulic power, delivered from the surface via an umbilical. Most subsea developments also require injection of chemicals, e.g. for controlling internal wax formation, scaling, hydrates and corrosion. In subsea applications, the leakage of hydraulic control fluids and treatment chemicals will often be unacceptable both from the environmental and the operational points of view. Consequently, a high reliability joining technique is required for the small diameter hydraulic/chemical injection tubing and associated fittings. The present study aims to conduct the study of the influence of welding of different 316L stainless steel specimens through the autogenous orbital GTAW welding process. The work was carried out through a case study in a company X, using AISI 316L austenitic stainless steel pipe from different manufacturers as test specimens, using specific parameters predefined in the welding procedure specification (WPS) to map and understand the possible causes of non-repeatability of the welding program, proposing improvements in the process, such as a work system. Metallographic characterization and mechanical tests were conducted, to identify which characteristic in the raw material could be contributing to the need to change the welding current, in addition, analysis of the Schaeffler diagram, the chemical composition of the test specimens and the results of heat input were also essential for the elaboration of the results achieved. The results indicated that, in fact, there is a difference in the weldability of samples of specimens from different manufacturers, thus showing the complexity of the welding process for small diameter pipes and showing the importance of controlling the raw materials used and the implementation of a work system. In this way, it is essential to separate the raw material by supplier during its receipt and handling in production.

Keywords: aisi 316l; autogenous orbital welding; wps; different manufacturers small tubing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classes de aços inoxidáveis austeníticos.....	20
Figura 2: Microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico .....	20
Figura 3: Soldagem TIG manual .....	27
Figura 4: Soldagem TIG orbital mecanizada.....	28
Figura 5: Processo Orbital .....	29
Figura 6: Dimensões do Corpo de prova.....	32
Figura 7: Tubos de aço inoxidável AISI 316L .....	33
Figura 8: Esquema da configuração da junta com chanfro reto ou sem chanfro.....	34
Figura 9: Representação da posição de soldagem .....	34
Figura 10: Representação do posicionamento do cabeçote orbital.....	35
Figura 11: Fonte de soldagem Maxstar 280 .....	35
Figura 12: Programa corrente pulsada.....	36
Figura 13: Sequência do ponteamento .....	36
Figura 14: Fonte de soldagem .....	37
Figura 15: Sistema de purga associado ao manômetro diferencial .....	37
Figura 16: Aspecto do eletrodo de tungstênio.....	38
Figura 17: Concavidade externa.....	39
Figura 18: Relógio Comparador (precisão .001") .....	39
Figura 19: CPs soldados 1-C .....	40
Figura 20: Visual dimensional com o relógio comparador .....	41
Figura 21: CPs- amostras retiradas dos 4CPs soldados.....	41
Figura 22: Concavidade encontrada 0.011".....	42
Figura 23: Concavidade encontrada 0.005" .....	43
Figura 24: Concavidade encontrada 0.018".....	43
Figura 25: Concavidade encontrada 0.005".....	44
Figura 26: Resultado do ensaio de radiografia do CP A4 .....	45
Figura 27: Diagrama de Schaeffler.....	46
Figura 28: Aspecto como recebido das amostras dos tubos de diferentes fabricantes .....	49
Figura 29: Aspecto micrográfico do tubo A com microestrutura austenítica. Ataque Oxálico ....	50

Figura 30: Aspecto micrográfico do tubo B.....	50
Figura 31: Aspecto micrográfico do tubo C.....	51
Figura 32: Ensaio de Tração.....	52
Figura 33: Aspecto micrográfico dos tubos A, B e C.....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química 316L.....	21
Tabela 2: Classificação das descontinuidades.....	24
Tabela 3: Parâmetros usados da especificação de procedimento de soldagem para soldas de união de AISI 316L usando GTAW orbital automático autógeno.....	33
Tabela 4: Parâmetros do teste C.....	40
Tabela 5: Parâmetros do teste B.....	42
Tabela 6: Parâmetros do teste A.....	44
Tabela 7: Parâmetros do teste inverso.....	45
Tabela 8: Comparações de contagem de ferrita do metal de solda.....	47
Tabela 9: Comparações da composição química das amostras testadas.....	47
Tabela 10: Comparações do heat input das amostras testadas.....	48
Tabela 11: Resultado ensaio de tração.....	52
Tabela 12: Medidas de Microdureza Vickers (carga de 100g).....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Amperagem (corrente)

AISI – *American Iron and Steel Institute* ASTM - *American Society of Testing Materials* AWS – *American Welding Society*

C<sub>req</sub> - Cromo equivalente

END - Ensaio Não Destrutíveis

EPS - Especificação de Procedimento de Soldagem G – *Groove* (Chanfro)

GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding*

HI – *Heat input* – Entrada de calor "a energia fornecida pelo arco de solda à peça de trabalho, que é transformada em calor"

J – Joule: unidade de medida de trabalho, de energia ou de quantidade de calor equivalente ao trabalho produzido por uma força de 1 (um) newton cujo ponto de aplicação desloca-se 1 (um) metro na direção da força.

N<sub>ieq</sub> - Níquel equivalente O - |Oxigênio

S – Enxofre (Tabela periódica)

SO – Soldagem Orbital t - tempo

TIG - *Tungsten Inert Gas*

V – Tensão

END - Ensaio Não Destrutivo.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Objetivos Gerais .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>16</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Aço Inoxidável.....</b>	<b>17</b>
2.1.1 Aço inoxidável ferrítico .....	17
2.1.2 Aço inoxidável martensítico .....	17
2.1.3 Aços ferríticos-austeníticos (duplex) .....	18
2.1.4 Aços inoxidáveis austenítico.....	18
2.1.5 Aços inoxidáveis endurecidos por precipitação.....	19
<b>2.2 Aços Inoxidáveis 316 e 316L .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3 Soldagem de aços encruados .....</b>	<b>21</b>
<b>2.4 Ensaio não destrutivo .....</b>	<b>22</b>
2.4.1 Inspeção Visual .....	22
2.4.2 Líquido Penetrante .....	23
2.4.3 Partículas Magnéticas .....	23
2.4.4 Ultrassom .....	23
2.4.5 Raio X.....	23
<b>2.5 Defeito de soldagem .....</b>	<b>24</b>
2.5.1 Falta de Fusão.....	25
2.5.2 Falta de Penetração.....	25
2.5.3 Porosidades.....	25
2.5.4 Inclusões de tungstênio .....	25
2.5.5 Mordedura .....	26
2.5.6 Trincas .....	26
<b>2.6 Processo de soldagem TIG manual .....</b>	<b>26</b>

2.7 Processo de soldagem TIG orbital automatizado.....	27
2.8 Processo orbital .....	28
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
<b>4 ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>31</b>
4.1 Identificação do problema.....	31
4.2 Teste.....	32
4.2.1 Procedimento - EPS .....	32
4.2.2 Matéria prima.....	33
4.2.3 Ponteamento .....	35
4.2.4 Soldagem dos Corpos de Prova .....	36
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>39</b>
5.1 Soldagem dos corpos de prova.....	39
<b>6 DISCUSSÕES .....</b>	<b>46</b>
6.1 Análise com diagrama de Schaeffler .....	46
6.2 Composição química dos corpos de provas .....	47
6.3 Análise dos resultados ( <i>Heat input</i> ).....	48
6.4 Análise dos resultados de laboratório .....	49
6.4.1 Metalográfica .....	49
6.4.2 Ensaio de Tração .....	51
6.4.3 Microdureza .....	52
<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As descobertas no pré-sal estão entre as mais importantes do setor de energia em todo o mundo na última década. Esta é uma realidade que coloca o país em uma posição estratégica frente à grande demanda de energia mundial. No que diz respeito ao transporte dos produtos, a malha dutoviária, quando comparada ao transporte rodoviário, permite ganhos ambientais expressivos em função de maior flexibilidade, aumento da segurança operacional, redução do número de acidentes e vazamentos e do volume de emissões atmosféricas (PETROBRAS, 2018).

Este sistema pode transportar diferentes matérias-primas e podem ser classificados de acordo com a substância transportada, por exemplo, gasodutos, oleodutos, minerodutos, carbodutos e polidutos, bem como, ser classificado de acordo com a localização de sua construção, como subterrâneos, aparentes, aéreos e submarinos. As tubulações são empregadas desde a extração e transporte até o processamento e distribuição destes produtos. Elas fazem o óleo chegar até as refinarias e ajudam na hora de escoar a produção (PETROBRAS, 2018).

Neste contexto, a maioria dos processos de fabricação, além de atuarem de forma direta na montagem, exercem um papel essencial nas manutenções e reparos do sistema dutoviário, tanto em instalações denominadas *On-shore*, situadas no meio terrestre, quanto *off-shore*, localizadas em alto mar. Nesse processo, as soldagens se tornam de suma importância, pois ajuda na recuperação de peças, equipamentos e estruturas. Além disso, é aplicável a uma série de processos de produção, promovendo juntas de eficiência elevada em vários materiais.

De acordo com Salleh (2014), a soldagem orbital é um processo de soldagem quase semelhante ao processo de soldagem tradicional, GTAW. A principal diferença é que soldagem orbital não usa metal de adição. As peças a serem soldadas são presas juntas e um eletrodo de tungstênio que passa sobre a junta cria um arco de soldagem que funde a junta, unindo-as para formar uma junta perfeita. Para evitar contaminação, o metal fundido é protegido por um gás inerte. O processo de soldagem orbital está em uso há mais de 50 anos nas diversas indústrias listadas abaixo:

- Aeroespacial
- Tubo de caldeira
- Indústrias de alimentos, laticínios e bebidas

- Tubulações nucleares
- Indústria farmacêutica
- Conexões de tubo/tubo, válvula e reguladores
- Aplicações offshore

Uma tendência para a mecanização e automatização de operações de soldagem vem ocorrendo de forma intensa nas últimas décadas. Simultaneamente avanços significativos em técnicas de modelagem possibilitaram uma verdadeira revolução no estudo e na simulação de processos industriais, o que acabou por alcançar, também, o campo da soldagem. Apesar de tudo isto, as operações de soldagem ainda guardam muito de empirismo e magia que insistentemente resiste aos avanços da automação e da simulação matemática. Com a demanda e competitividade, cada dia mais as empresas buscam por processos com mais qualidade, produtividade e consequentemente com menor custo (MODENESI, 2013)

Toda vez que o processo de soldagem é realizado em um corpo de prova proveniente de um fornecedor distinto, é necessário a realização do ajuste de parâmetro, pois o mesmo valor de amperagem não se replica, o que é de imprescindível para garantir os critérios de aceitação do procedimento x, como exemplo a concavidade externa, falta de fusão, falta de penetração e/ou penetração excessiva.

O desempenho da junta soldada, bem como do produto vai estar ligado diretamente ao controle de qualidade que deve ser realizado nas juntas soldadas. Logo é fundamental realizar esse controle através dos ensaios não destrutivos como, visual e radiografia.

### **1.1 Objetivos Gerais**

O presente estudo tem como objetivo realizar a avaliação do processo de soldagem GTAW orbital autógeno, tal como a sua influência utilizando corpos de prova tubos AISI 316L de 3/8" de diâmetro e 0.065" de espessura, oriundos de fornecedores diferentes.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Garantir que as juntas soldadas pelo processo GTAW orbital autógeno estejam dentro do critério de aceitação dos ensaios não destrutivos, como visual e radiografia.
- Entender as possíveis causas para não repetibilidade do programa de soldagem, bem como identificar possíveis dificuldades encontradas durante o processo quando aplicado em materiais de diferentes fabricantes de tubos AISI 316L.

- Propor soluções de melhorias no processo.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Aço Inoxidável**

Os Aços inoxidáveis são ligas ferrosas com teor de cromo superior a 10-12% (este valor mínimo varia de autor para autor) que apresentam resistência à corrosão em meios aquosos na presença de inúmeros agentes orgânicos e minerais agressivos e/ou resistência à corrosão a altas temperaturas, seu mecanismo principal é a formação de uma camada superficial de óxido de cromo aderente e impermeável, isto é, uma barreira entre o material e o meio ambiente, camada passiva. A camada passiva é mais efetiva em meios oxidantes (OLIVEIRA, 2019).

A classificação para os aços inoxidáveis na ABNT N BR 5601, também segue a classificação da AISI, a mesma é baseada de acordo com suas estruturas cristalinas à temperatura ambiente. Segundo divididos em: ferríticos, martensíticos, ferríticos-austeníticos (duplex), austeníticos e endurecidos por precipitação (OLIVEIRA, 2019).

#### **2.1.1 Aço inoxidável ferrítico**

Segundo Modenesi (2001), os aços classificados ferríticos são ligas Fe-Cr de estrutura predominantemente ferrítica em qualquer temperatura até a sua fusão. Têm entre 12 e 30% de cromo e um baixo teor de carbono, em geral, inferior a 0,12%. Como não podem ser completamente austenitizados, estes aços não são endurecíveis por têmpera e sua granulação só pode ser refinada por uma combinação de trabalho mecânico seguido de recozimento para a recristalização da estrutura encruada.

Para Oliveira (2019), são aços com boas características de resistência a corrosão, em especial a trincas de corrosão sob tensão e de tenacidade média a baixa. Os principais graus de aços dessa família, são: (AISI) 405, 430, 430F, 446, 502 (SILVA; MEI, 2006).

#### **2.1.2 Aço inoxidável martensítico**

Os aços classificados martensíticos são essencialmente ligas Fe-Cr-C que contêm entre 12 e 18% de cromo e entre 0,1 e 0,5% de carbono e que podem ser austenitizados se forem aquecidas a uma temperatura adequada (MODENESI, 2001).

Dentre as características desse material, pode-se citar que, são ferro-magnéticos; são facilmente trabalhados tanto a frio como a quente, principalmente quando o teor de carbono é baixo; possuem boa resistência a corrosão quando expostos ao tempo, à ação da água e de certas

substâncias químicas; a adição de níquel melhora a sua resistência a corrosão; assim como a têmpera também propicia essa melhora, pois contribui para evitar a precipitação de carbonetos.

(CHIAVERINI, 2002)

Incluem-se nessa família os aços: (AISI) 403, 410, 416, 420, 431, 440A, B e C, 501

(SILVA& MEI, 2006).

### 2.1.3 Aços ferríticos-austeníticos (duplex)

Os aços duplex contêm 18 a 30%Cr, 1,5 a 4,5%Mo e adições de elementos formadores e estabilizantes da austenita, principalmente o níquel (3,5 a 8%) e o nitrogênio (0 a 0,35%), para se obter uma microestrutura, à temperatura ambiente, formada de partes proporcionalmente iguais de ferrita e austenita (MODENESI, 2001).

Esses aços possuem crescente utilização, principalmente em aplicações que exigem maior resistência a corrosão, maior resistência à oxidação e tenacidade adequando, quando comparados aos austeníticos. São considerados superiores também, por apresentarem melhor resistência a corrosão localizada e melhor resistência ao trincamento por corrosão sob pressão.

(CHIAVERINI, 2002)

Incluem-se nessa família os aços: AISI 329, UNS S32304 e S31803 (SILVA& MEI, 2006).

### 2.1.4 Aços inoxidáveis austenítico

Os aços classificados austeníticos são principalmente, ligas Fe-Cr-Ni, embora existam ligas em que parte ou todo o níquel foi substituído por manganês e nitrogênio. Apresentam estrutura predominantemente austenítica, não sendo endurecíveis por tratamento térmico, mas podendo ser endurecíveis por encruamento. Contêm entre cerca de 6 e 26% de níquel, 16 e 30% de cromo e menos de 0,30% de carbono, com um teor total de elementos de liga de, pelo menos, 26%. Encontram aplicações na indústria química, alimentícia, de refino de petróleo e em diversos outros casos em que boa resistência a corrosão, facilidade de limpeza e ótimas características de fabricação são necessárias (MODENESI, 2001).

Para Modenesi, estes aços formam o grupo mais numeroso e utilizado dos aços inoxidáveis, representam em torno de 70% da produção mundial destes aços. Dentre as características desse material, pode-se citar que, são magnéticos; não endurecíveis por serem austeníticos; as propriedades mecânicas dependem essencialmente da condição do material, se

ele se encontra, recozido ou encruado (CHIAVERINI, 2002). Incluem-se nessa família os aços: (AISI) 301, 302, 304, 304L, 308, 310, 316, 316L, 317, 321, 347 (SILVA& MEI, 2006).

#### 2.1.5 Aços inoxidáveis endurecidos por precipitação

Nessa classificação de aços inoxidáveis, incluem ligas Fe-(12,5 a 17%), (4 a 30%)Ni, com adições de Al, Cu, Nb e/ou Ti, sendo estes últimos os responsáveis pela formação de precipitados que causam o endurecimento da liga. Estes aços são capazes de desenvolver elevados níveis de resistência mecânica pela formação de finos precipitados, em alguns casos, junto com uma microestrutura martensítica, com ductilidade e tenacidade superiores a outros aços de resistência similar em conjunção com boa resistência à corrosão e oxidação. De acordo com a estrutura do aço antes do tratamento de precipitação, estes podem ser divididos em martensíticos, semi-austeníticos e austeníticos. (MODENESI, 2001).

### 2.2 Aços Inoxidáveis 316 e 316L

Aços inoxidáveis austeníticos do tipo 316L consistem em uma matriz de ferro-cromo-níquel, isto é, uma matriz de átomos de ferro cúbicos de faces centradas (CFC), com átomos em solução de inserção sólida (como carbono ou nitrogênio) e átomos em solução sólida de substituição (molibdênio, silício, manganês). Impurezas (enxofre, fósforo) também estão presentes em pequenas quantidades (SILVA et.al. 2020).

Os aços inoxidáveis 316L fazem parte da série 300, esses são não-magnéticos, conforme pode ser observado na Figura 1, a base de formação dessa série de aços é Fe-Cr-Ni. A 2, demonstra uma microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico.

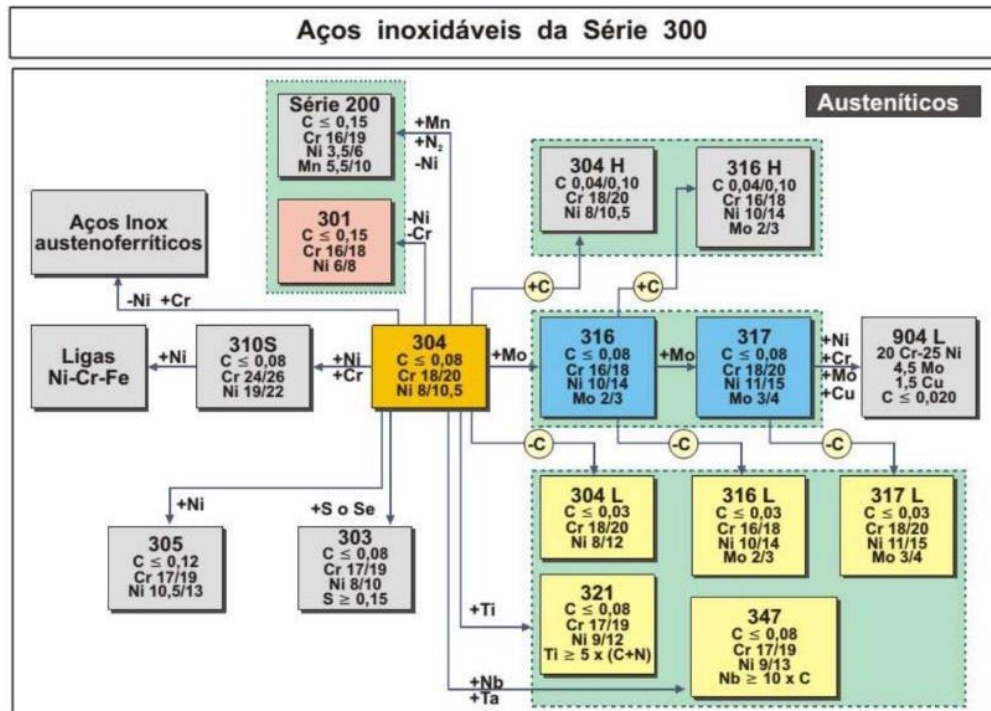


Figura 1: Classes de aços inoxidáveis austeníticos

Fonte: Carbó (2008)

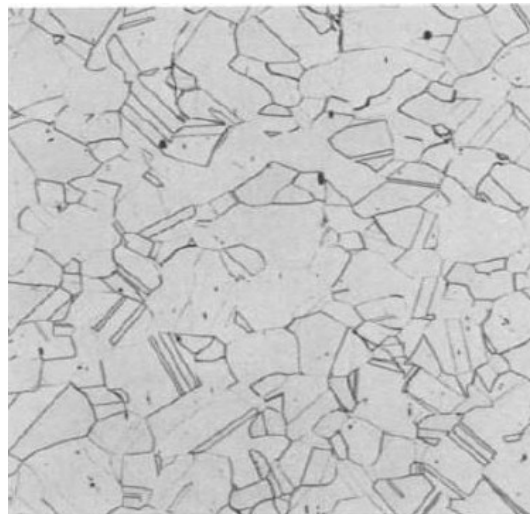


Figura 2: Microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico

Fonte: Altieri (2016)

Adição de diferentes elementos de liga ao aço tem como objetivo melhorar as propriedades mecânicas, resistência à corrosão ou controlar a microestrutura. Ver composição química do aço inoxidável 316L na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química 316L

Grade	UNS Designation	Composition											
		Carbon	Manganese	Phosphorus	Sulfur	Silicon	Chromium	Nickel	Molybdenum	Nitrogen <sup>B</sup>	Niobium <sup>N</sup>	Titanium	Other Elements
C	S31272	0.08–0.12	1.50–2.00	0.030	0.015	0.30–0.70	14.0–16.0	14.0–16.0	1.00–1.40	...	...	0.30–0.60	B 0.004–0.008 Cu 0.50–1.50
C	S31277	0.020	3.00	0.030	0.010	0.50	20.5–23.0	26.0–28.0	6.5–8.0	0.30–0.40	...	...	...
TP316	S31600	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	16.0–18.0	10.0–14.0	2.00–3.00	...	...	...	...
TP316L	S31603	0.035 <sup>?</sup>	2.00	0.045	0.030	1.00	16.0–18.0	10.0–14.0	2.00–3.00	...	...	...	...
TP316H	S31609	0.04–0.10	2.00	0.045	0.030	1.00	16.0–18.0	11.0–14.0	2.00–3.00	...	...	...	...

Fonte: ASME BPVC.II. A-2021

O aço inoxidável 316L conforme ASTM A269 é uma escolha comum para tubos de controle de pequenos diâmetros utilizados em sistemas de controle, especialmente para instalações *offshore* em águas rasas. Esses itens geralmente não são pintados, as instrumentações são dobradas a frio e recebem uma proteção catódica para evitar sua corrosão (Guide to Materials Selection and Corrosion Control for Subsea Energy Equipment, 2019)

### 2.3 Soldagem de aços encruados

Segundo Lopes (2009), o endurecimento do metal se resume ao endurecimento por deformação plástica. O endurecimento é devido ao aumento da tensão causada pelo aumento da deformação plástica, diminuindo a mobilidade das discordâncias do aço, aumentando a quantidade delas, necessitando de maior tensão para causar deformação plástica

De acordo com Tschiptschin et. al. (2010), para os aços inoxidáveis austeníticos, o encruamento é o método de endurecimento de metais mais utilizado, pelo fato de sua estrutura ser CFC (cúbica de face centrada) na temperatura ambiente, não sujeito a tratamento térmico de endurecimento.

Como a principal característica do aço inoxidável é sua resistência à corrosão, ao soldar esse tipo de metal é necessário limpá-lo para evitar contaminantes nocivos e evitar irregularidades no cordão de solda que podem acumular sujeira e criar pontos de corrosão. Além disso, os aços inoxidáveis possuem propriedades físicas diferentes dos outros aços, o que significa diferenças nos procedimentos de soldagem. (MODENESI,2011).

Em relação a soldabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos, eles são propensos a sensibilização, para tentar corrigir esse problema na solda, bem como problemas de deformação, recomenda-se usar uma velocidade de soldagem maior para reduzir a energia térmica. A distorção pode aparecer devido ao fato de que o coeficiente de expansão térmica desse metal é alto. Normalmente é usada uma corrente de soldagem moderada, menor que a usada para aços

macios, por exemplo, devido ao seu baixo ponto de fusão e condução de calor. O aparecimento de fissuras pode ocorrer com solidificação totalmente austenítica, esta condição é mitigada pelo uso de um ligante de solidificação austeno-ferrítico (MODENESI, 2011).

Os metais encruados, na zona termicamente afetada da solda são submetidos à recristalização e ao superaquecimento. Essas transformações podem estar associadas a modificação alotrópica como no caso dos aços. Se o aço ou a liga metálica não tiver ponto de transformação, existirá uma região superaquecida única e mais extensa. A recristalização e o superaquecimento diminuem a resistência mecânica do metal encruado. Se as regiões correspondentes da zona termicamente afetada forem estreitas, a resistência mecânica global da peça não será afetada, graças ao efeito de consolidação (SOLTEC,2023).

## **2.4 Ensaios não destrutivos**

De acordo com a Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção (ABENDI, 2012), os ensaios não destrutivos (END) se preocupam com as técnicas utilizadas na inspeção de materiais e dispositivos para detectar defeitos, descontinuidades, com o objetivo de manter a indústria e a própria sociedade sem acidentes.

Um defeito nada mais é do que uma descontinuidade que pela sua natureza, tipo, dimensões, localização ou efeito cumulativo torna uma peça inutilizável por não atender aos requisitos mínimos de aceitabilidade da norma aplicável. Uma descontinuidade é uma quebra na estrutura típica de uma peça em termos de uniformidade nas propriedades físicas, mecânicas ou metalúrgicas (LEITE, 1196; ANDREUCCI, 2003).

### **2.4.1 Inspeção Visual**

A inspeção por ensaio visual é o primeiro ensaio não destrutivo aplicado a qualquer tipo de peça ou componente, combinado com outros ensaios. Esta técnica permite a detecção e análise de várias descontinuidades superficiais, como corrosão, contaminação, acabamento superficial e rachaduras superficiais. Sua principal vantagem é fornecer dados quantitativos (além de informações qualitativas) com mais facilidade do que outros testes não destrutivos. Alguns testes são baseados nas leis da óptica geométrica, outros usam as propriedades ondulatórias da luz. Este teste foi usado principalmente para inspecionar: superfícies expostas ou acessíveis de materiais opacos e dispositivos parcialmente ou totalmente montados e itens acabados; e o interior de objetos transparentes ou translúcidos como vidro, quartzo, alguns plásticos, além de líquidos e gases (SAMPAIO, 2009).

#### 2.4.2 Líquido Penetrante

Consiste na aplicação de um líquido com propriedades especiais (molhantes) na superfície do detalhe, que deve estar suficientemente limpa e seca, para que o líquido penetre nas descontinuidades presentes no detalhe após algum tempo. Em seguida, o excesso de líquido é removido para que um produto chamado revelador possa ser aplicado na superfície. Por sua vez, esse revelador absorverá o fluido preso nas descontinuidades. Uma imagem da descontinuidade é então desenhada na superfície, que será avaliada de acordo com o padrão utilizado na fabricação da peça ou material. (MIX 2005; ANDREUCCI, 2013).

#### 2.4.3 Partículas Magnéticas

É um método não destrutivo usado no teste de materiais ferromagnéticos para detectar e localizar descontinuidades. O método de ensaio consiste em submeter a amostra ou sua área a um campo magnético. Caso existam descontinuidades ocorrerá a criação de campos de fuga ou dispersão em função de uma falta de continuidade nas propriedades magnéticas da peça. O uso das partículas magnéticas, possibilita que o ensaio possua uma razoável sensibilidade, economia e praticidade (OLIVEIRA, 2019).

#### 2.4.4 Ultrassom

O uso dos fenômenos ondulatórios, em materiais sólidos, tem sido aprofundado para a detecção de fissuras, lacunas, porosidade, descontinuidades internas, medição de espessura e análise das propriedades do material. As ondas ultrassônicas são ondas mecânicas que se propagam em meios elásticos, isto é, em materiais com capacidade de se deformar ao sofrer um esforço e voltar à forma original após o esforço ser retirado. A velocidade de propagação da onda depende do meio em que a onda se propaga. Quando comparado a outros métodos não destrutivos, o ensaio por ultrassom apresenta vantagens tais como elevado poder de penetração, o que torna possível a detecção de descontinuidades em grandes profundidades; alta precisão na determinação da posição e dimensionamento de descontinuidades, além de alta portabilidade (STEIN, 2017; SANTIN, 2003).

#### 2.4.5 Raio X

É um método de ensaio não destrutivo que tem por objetivo realizar um registro de imagem obtido através da penetração da radiação, quando atravessa um material e atinge um filme fotográfico. O ensaio radiográfico baseia-se na absorção diferenciada da radiação pela matéria. Consiste em fazer passar um feixe de radiação X, radiação gama ou nêutrons através do

objeto em estudo e registrar as características da radiação emergente do objeto utilizando um meio adequado, como um filme radiográfico, uma tela fluorescente ou dispositivos eletrônicos de detecção de imagem radiográfica (LEITE, 1196; ANDREUCCI, 2003).

## 2.5 Defeito de soldagem

Segundo a norma PETROBRAS N-1738 (2013), descontinuidade é a interrupção das estruturas típicas de uma peça, no que se refere à homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas. Não é necessariamente um defeito, devendo ser considerado um quando, por sua natureza, dimensões ou efeito acumulado, tornar a peça não conforme, por não atender os requisitos mínimos da norma técnica aplicável. A Tabela 2 exibe de forma simples e direta, as três categorias básicas de descontinuidades:

Tabela 2: Classificação das descontinuidades

<b>Descontinuidades dimensionais</b>	<b>Descontinuidades estruturais</b>	<b>Propriedades inadequadas</b>
Distorção	Porosidades	Propriedades mecânicas
Dimensões incorretas da solda	Inclusões de tungstênio	Propriedades químicas e outros
Perfil incorreta da solda	Falta de fusão	
	Falta de penetração	
	Penetração excessiva	
	Mordedura	
	Trincas e outros	

Fonte: Marques (2005)

As soldas das tubulações de pequenos diâmetros (tubing) são 100% submetidas a ensaio não destrutíveis em busca de garantir sua integridade. O ensaio visual por ser mais rápido e barato é o primeiro a ser realizado, onde pode ser identificado descontinuidades e defeitos como, por exemplo, concavidade externa que pode comprometer a espessura do metal de base, poro, trinca e mordedura. Para o ensaio volumétrico é utilizado Radiografia com a função de ensaio complementar e pode identificar defeitos internos como, falta de fusão, falta de penetração, penetração excessiva, poro, inclusão de tungstênio e trinca (Guide to Materials Selection and Corrosion Control for Subsea Energy Equipment, 2019).

### 2.5.1 Falta de Fusão

Este termo refere-se à ausência de uma conexão de fusão entre as camadas adjacentes da solda ou entre a solda e a metal base. A falta de penetração é causada pelo aquecimento inadequado do material soldado devido ao manuseio incorreto do eletrodo, uso de pouca energia de soldagem, soldagem em chanfros muito apertados e até mesmo não limpeza da solda. Essa descontinuidade é um forte concentrador de tensão que pode facilitar o início da trinca, bem como reduzir a seção transversal efetiva da solda para resistir ao estresse mecânico (MODENESI, 2001)

### 2.5.2 Falta de Penetração

Este termo refere-se à falta de fusão e preenchimento completo da raiz da articulação. A falta de penetração é causada por vários fatores, incluindo manuseio incorreto do eletrodo, desenho inadequado da junta (ângulo de chanfro pequeno ou gap de raiz) ou alternativamente escolher um eletrodo muito grande para uma determinada fase (em ambos os casos se torna difícil ou impossível direcionar o arco para a raiz da junta) e o uso de baixa energia de soldagem. A falta de penetração reduz a porção útil da solda, além de ser um concentrador de tensões. Deve-se notar que os selos são frequentemente referidos como tendo penetração parcial. Nesses casos, a falta de fusão, desde que dentro dos limites especificados, não é considerada defeito de soldagem (MODENESI,2001).

### 2.5.3 Porosidades

A porosidade é causada pela evolução de gases na parte de trás da poça de fusão à medida que a solda solidifica. Os poros são geralmente de forma esférica, embora os poros estruturas alongadas podem se formar, geralmente ligadas ao hidrogênio. As principais causas operacionais da porosidade estão relacionadas com contaminação com sujeira, oxidação e umidade na superfície do metal original, consumíveis de soldagem ou equipamento de soldagem (por exemplo, fluxo muito alto ou problemas no equipamento ou devido a correntes de ar). Parâmetros de soldagem inadequados, como corrente excessiva e arco muito longo, também podem causar porosidade, especialmente na soldagem SMAW (MODENESI,2001).

### 2.5.4 Inclusões de tungstênio

Este tipo de defeito consiste no aprisionamento de corpos estranhos na massa de metal fundido, formados como resultado de reações que se processam e persistem na peça após a solidificação da solda. Pode haver vários tipos de inclusões, por exemplo, inclusões de escória,

óxidos, metal, tungstênio, no caso da soldagem TIG etc., sendo as inclusões de escória as mais comuns (MACHADO, 2010). Segundo Modenesi (2001), as inclusões de escória podem atuar como concentradores de tensões, favorecendo a formação de trincas.

#### 2.5.5 Mordedura

Trata-se de uma descontinuidade estrutural onde o metal base se funde nas extremidades do cordão de solda sem preencher a área, fazendo com que surjam depressões acentuadas entre o cordão de solda e o metal base. O manuseio inadequado do eletrodo, alta velocidade de soldagem e comprimento de arco excessivo podem causar o aparecimento desse defeito (MODENESI,2001).

#### 2.5.6 Trincas

Segundo Marques et.al. (2005), as descontinuidades são consideradas as mais graves na soldagem, contribuindo para a ocorrência de fratura frágil por serem os principais concentradores de tensões. As trincas podem ser entendidas como uma resposta à incapacidade do material de suportar os esforços impostos localmente pelas tensões criadas no processo de soldagem. O calor excessivo, causando expansão e contração da peça, faz com que apareçam tensões bi ou triaxiais na área de solda. Tensões combinadas com mudanças na microestrutura durante a soldagem e/ou a presença de certos elementos podem causar trincas.

### **2.6 Processo de soldagem TIG manual**

No processo de soldagem TIG, a energia necessária para a fusão vem de um arco elétrico mantido entre um eletrodo de tungstênio não fusível e a peça de trabalho. A poça de fusão é protegida por um fluxo de gás inerte, geralmente hélio ou argônio ou uma mistura de ambos. Os processos industriais de soldagem TIG são em sua maioria manuais, mas é possível utilizar equipamentos e sistemas auxiliares para mecanizar as operações. (WAINER; BRANDI; DE MELLO, 1992).

Em GTAW, quando se define soldagem manual isso significa que uma pessoa irá controlar todas as funções do processo de soldagem, como aplicação do metal de adição e o gás, a soldagem manual utiliza a tocha, cabos e condutores elétricos, pedal de pé (para controle de nível de corrente de soldagem) e controles de fluxo de gás. (BRACARENSE, 2000). Veja na Figura 3.



Figura 3: Soldagem TIG manual

Fonte: Autor (2023)

A soldagem TIG é utilizada com muita eficiência para unir chapas relativamente finas, o que se deve ao excelente controle da energia que é transferida pelo arco elétrico para a peça. Com controle total da energia, obtém-se um arco suave e estável, resultando em soldas de boa aparência e qualidade. Este processo pode ser aplicado à maioria dos metais em uma variedade de faixas de espessura. Porém, como o custo é relativamente alto, seu uso mais comum é em aços inoxidáveis e ligas de metais não ferrosos (MODENESI; BRACARENSE; MARQUES, 2009).

### **2.7 Processo de soldagem TIG orbital automatizado**

A pressão para reduzir custos e aumentar a produtividade da mão de obra acaba levando muitas empresas a investirem em automação, inclusive de soldagem. Isso reduz a demanda por soldadores já que muitos trabalhos repetitivos estão sendo automatizados, porém também surge no mercado a necessidade de contratação de soldadores que montam, operam e programam estas máquinas, proporcionando uma oportunidade profissional (DE MORAES SPERB et al., 2018).

Principalmente para a mecanização, na qual há menor margem para não conformidades na montagem dos tubos e na regulagem das variáveis, o principal desafio na soldagem orbital é constituído pela necessidade de sustentar a poça de fusão em posições que desafiam a gravidade

e, por isso, há a necessidade de estratégias muito bem concebidas a fim de que a poça metálica se sustente no espaço. Portanto, a energia de soldagem tem de se situar em uma determinada faixa de valores específicos. (SARTORI et al., 2017)

A união de tubos de pequeno diâmetro e de espessura reduzida utiliza junta de topo e passe único. Os tubos são mantidos estacionários, ao passo que o eletrodo se desloca ao longo da junta formando um cordão de solda homogêneo e com propriedades próximas às do metal base. A operação em si é concebida sob uma atmosfera de gás inerte, responsável pela proteção das extremidades do eletrodo, da poça fundida e das regiões aquecidas da peça contra a contaminação atmosférica (ORLOWSKI DE GARCIA et.al., 2007). Veja na Figura 4:



Figura 4: Soldagem TIG orbital mecanizada

Fonte: Autor (2023)

## 2.8 Processo orbital

Segundo Modenesi (2013), o processo de soldagem a arco TIG (ou GTAW) é muito usado na soldagem de materiais mais nobres, incluindo aços inoxidáveis e ligas de metais reativos, e quando um bom acabamento e uma elevada qualidade das soldas são requeridos. Frequentemente, o processo é aplicado de forma mecanizada ou automatizada. Especialmente nestes casos, variações expressivas no formato do cordão associadas, por exemplo, com mudanças pequenas de composição química, propriedades mecânicas e metalúrgicas do metal

base, usualmente dentro do permitido por normas técnicas, são altamente indesejáveis. Veja na Figura 5.

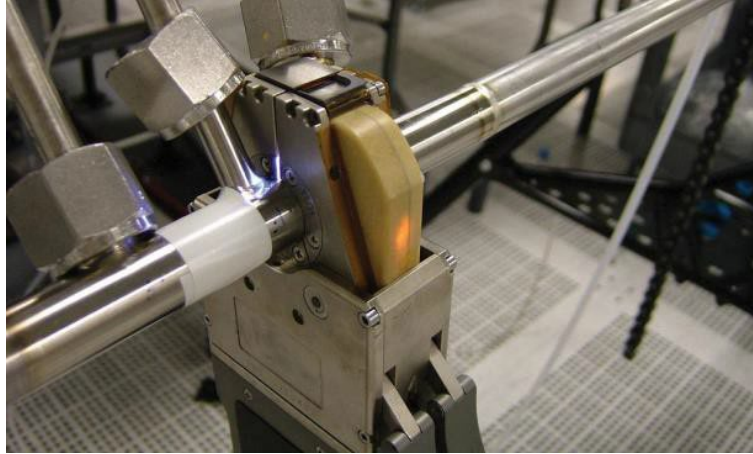


Figura 5: Processo Orbital

Fonte: The Fabricator (2015)

O processo GTAW é o mais recomendado para tubulações de aplicação submarinas. Embora a soldagem manual possa ser empregada, recomenda-se que a soldagem orbital automatizada seja utilizada a fim de garantir a produção consistente e econômica de soldas sem defeitos de alta qualidade, especialmente para diâmetros de tubulação menores. Na faixa de tamanho de interesse atual, normalmente de  $\frac{1}{4}$  a 1 polegada de diâmetro externo, o processo é geralmente empregado de forma autógena (ou seja, sem adição de material de adição) com produtos automatizados. Uma vez que uma condição de soldagem aceitável tenha sido estabelecida e inserida na memória do equipamento, a soldagem orbital automatizada é capaz de produzir um grande número de soldas de alta qualidade sem ajuste adicional, desde que o nível necessário de tolerância de ajuste seja mantido (Guide to Materials Selection and Corrosion Control for Subsea Energy Equipment, 2019).

### 3 METODOLOGIA

Qualquer trabalho de investigação científica se faz necessário confrontar dados coletados de observação ou experimentação, sendo parte importante na realização da pesquisa, pois através deste capítulo são definidos os métodos e técnicas a serem utilizados pelo pesquisador (QUIVY & CAMPENHOUDT, 1992).

Este capítulo descreve a metodologia utilizada para alcançar os objetivos definidos neste trabalho. São abordadas informações que desenvolvem os fundamentos metodológicos da pesquisa em questão, tais como: a natureza e classificação da pesquisa, a área de atuação e localização, o universo e a amostra, a definição de variáveis, bem como a metodologia de a técnica.

O estudo de caso uma pesquisa de natureza empírica que investiga um fenômeno em um contexto da vida real, geralmente contemporâneo, quando a fronteira entre o fenômeno e o contexto em que está inserido não está bem definida. É uma análise aprofundada de um ou mais objetos (casos) para obtenção de conhecimento amplo e detalhado. Seu objetivo é aprofundar a compreensão de problemas que não foram adequadamente definidos (MATTAR, 1996), visando facilitar o entendimento, levantar hipóteses e questionamentos ou desenvolver teoria. Pensando nisso, este estudo caracteriza-se como um estudo de caso, pois caracteriza a participação da pesquisa na busca de soluções para um problema da população. (THIOLLENT, 1985).

A pesquisa quantitativa é um método de pesquisa social que coleta e processa informações usando técnicas estatísticas como porcentagem, média, desvio padrão, coeficiente de correlação, análise de regressão, etc. (MICHEL, 2005). Eles são frequentemente usados quando é necessário garantir a precisão dos resultados, evitar distorções na análise de interpretação e deixar uma margem de segurança com relação à inferência, ou seja, gerar medições precisas e confiáveis que permitem análises estatísticas. Logo a pesquisa em questão é considerada quantitativa, por ser realizada através de análises numéricas e técnicas estatísticas.

A motivação desse estudo surgiu em decorrência de uma condição de não reprodutibilidade dos parâmetros de soldagem desenvolvidos durante a qualificação da especificação do procedimento de soldagem. Por tanto, o objetivo desse trabalho é de elucidar possíveis causas para essa situação de não reprodutibilidade.

A fase exploratória da pesquisa inicia-se com a busca de publicações científicas a respeito de tema, a busca foi realizada na base *Scopus*, buscando as palavras chaves “AISI 316L”, “Soldagem orbital autógena”, “EPS” e “Diferentes fabricantes”. A partir daí foi realizada uma busca exploratória com os assuntos relacionados ao tema, selecionando artigos para uma leitura aprofundada.

A segunda etapa da pesquisa iniciou-se ao coletar amostras de corpos de provas de 3 diferentes fabricantes, que doravante serão denominados como, Fabricante A, Fabricante B e Fabricante C para realizar os testes buscando quais os parâmetros estariam diferentes. Foram realizados os mesmos testes em todos os corpos de provas e verificou que o comportamento não era o mesmo, gerando defeitos. Logo após foi feito todas as inspeções para validar e ensaios de laboratório.

Após a coleta dos dados e informações, iniciou-se a terceira etapa que se concentrou o principal objetivo da pesquisa, validação do processo de soldagem GTAW orbital autógeno, e sua influência utilizando corpos de prova tubos AISI 316L de 3/8" de diâmetro e 0.065" de espessura, oriundos de fornecedores distintos.

## **4 ESTUDO DE CASO**

### **4.1 Identificação do problema**

Essa pesquisa foi realizada em uma empresa multinacional, fornecedora de bens e serviços da indústria de óleo e gás. Os parâmetros aqui descritos foram desenvolvidos por esta empresa, e os critérios de aceitação são baseados em normas de fabricação e os requisitos complementares são fornecidos pelos seus clientes. Durante o estudo de caso, estava sendo realizado soldagem de projetos distintos na fábrica, cada projeto exige sua especificação técnica de acordo com aplicação dos seus equipamentos, e isso exige muito mais do controle do processo durante sua fabricação. Para esse estudo o critério de aceitação do perfil da concavidade externa da solda era um pouco mais rigoroso em comparação com outro projeto em curso.

Foi observado que os operadores estavam levando muito tempo para realizar o ajuste dos parâmetros nos corpos de prova realizados antes da soldagem do produto, de maneira que a solda atendesse aos critérios de aceitação do procedimento qualificado, como, concavidade externa, falta de fusão, falta de penetração e penetração excessiva. E não se entendia o que estava causando a dificuldade. Tinham momentos que o programa era replicado tranquilamente e outro momento o programa definido não era possível replicar, causando defeitos de soldagem. Como isso, os operadores levavam mais tempo de processo de ajuste no corpo de prova para garantir a solda dentro dos critérios de aceitação.

Para este estudo, foram realizados testes de soldagem em corpos de prova com processo

GTAW orbital autógeno, onde foram gerados programas com os valores dos parâmetros de soldagem como, corrente de pico e base, tempos de pico e base, e velocidade de soldagem com base na EPS qualificada.

#### 4.2 Teste

Para os testes realizados, foram utilizadas todas as características do procedimento qualificado, metal de base, configuração da junta, dimensões da junta, posição de soldagem, máquina de soldagem manual para ponteamto, orbital para soldagem, níveis do programa, gás de purga, gás de proteção, vazão do gás, tungstênio, pré-aquecimento e energia de soldagem. Veja na Figura 6 as dimensões do corpo de prova.

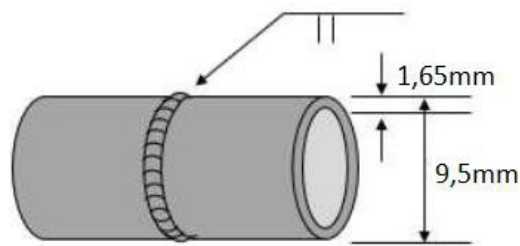


Figura 6: Dimensões do Corpo de prova

Fonte: Autor (2023)

##### 4.2.1 Procedimento - EPS

Foi utilizado a Especificação de Procedimento de Soldagem nº X, para soldas de união de tubos de aço inox AISI 316L usando GTAW orbital automático autógeno, atende a NACE MR0175/ISO15156 com dureza HV10. O limite de resistência mínimo especificado da junta soldada é de 75ksi. Parâmetros qualificados conforme Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros usados da especificação de procedimento de soldagem para soldas de união de AISI 316L usando GTAW orbital automático autôgeno.

Parâmetros de Soldagem			
<b>Processo e tipo:</b>	GTAW -Automático	<b>Gás de purga:</b>	Argônio 5.0
<b>Tipo de junta:</b>	União com chanfro reto	<b>Vazão do gás (l/min):</b>	5-35
<b>Material:</b>	AISI 316L	<b>Temperatura de operação (°C)</b>	25
<b>Diâmetro externo (" /mm):</b>	3/8 ou 9,5	<b>Espessura da parede (" / mm):</b>	0,065 ou 1,65
<b>Corrente de base (A):</b>	15 - 25	<b>Tensão (v):</b>	10
<b>Corrente de pico (A):</b>	30 - 48	<b>Velocidade de soldagem (mm/min):</b>	60
<b>Pulso (s):</b>	0,10	<b>Faixa de Heat Input J/mm):</b>	171- 702

Fonte: Cedido pela empresa X

Os parâmetros de soldagem são um guia, os mesmos podem variar dentro dos limites estabelecidos de aporte térmico. Caso haja alguma alteração nos parâmetros de soldagem, teste deve ser realizado para garantir que o aporte térmico esteja dentro da tolerância permitida na EPS.

#### 4.2.2 Matéria prima

Os tubos de aço inoxidável austenítico AISI 316L foram utilizados como matéria-prima para confecção dos corpos de prova estão apresentados na Figura 7.



Figura 7: Tubos de aço inoxidável AISI 316L

Fonte: Autor (2023)

A configuração da junta realizada nas mesmas dimensões dos corpos de provas utilizados para qualificação da EPS. Diâmetro de 9,5mm, espessura 1,65mm, abertura 0mm e chanfro reto ou sem chanfro conforme Figura 8.

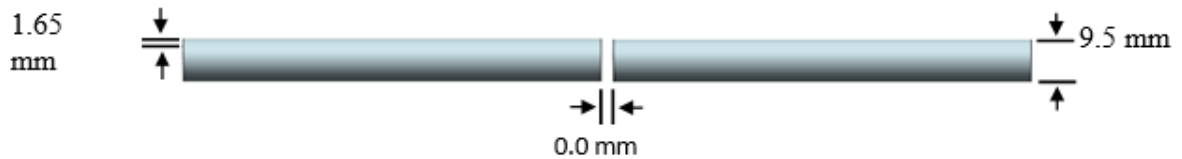


Figura 8: Esquema da configuração da junta com chanfro reto ou sem chanfro  
Fonte: Autor (2023)

A posição de soldagem utilizada nesse estudo foi 5G com progressão descendente e ascendente que completa um ciclo de 360°, utilizando quatro níveis com velocidades constantes conforme EPS qualificada. Ver representação na Figura 9.

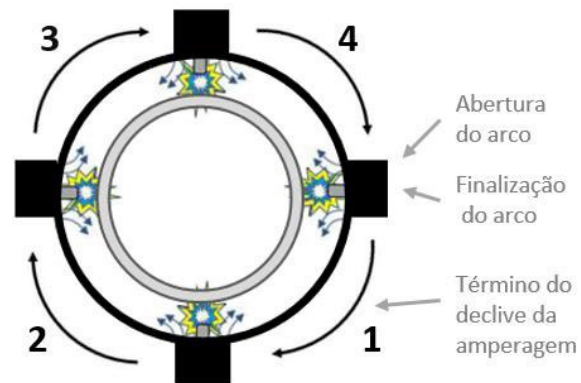


Figura 9: Representação da posição de soldagem

Fonte: Autor (2023)

Para o estudo de caso, foram utilizadas três amostras de diferentes fornecedores, e os parâmetros encontrados serão explicados no decorrer do trabalho, com objetivo de entender a causa dos ajustes necessários para atender aos critérios de aceitação do procedimento X.

A soldagem foi realizada utilizando o processo TIG Orbital sem deposição de material (soldagem autógena) conforme configuração do cabeçote demonstrado na Figura 10. O programa inicial foi preparado conforme EPS.

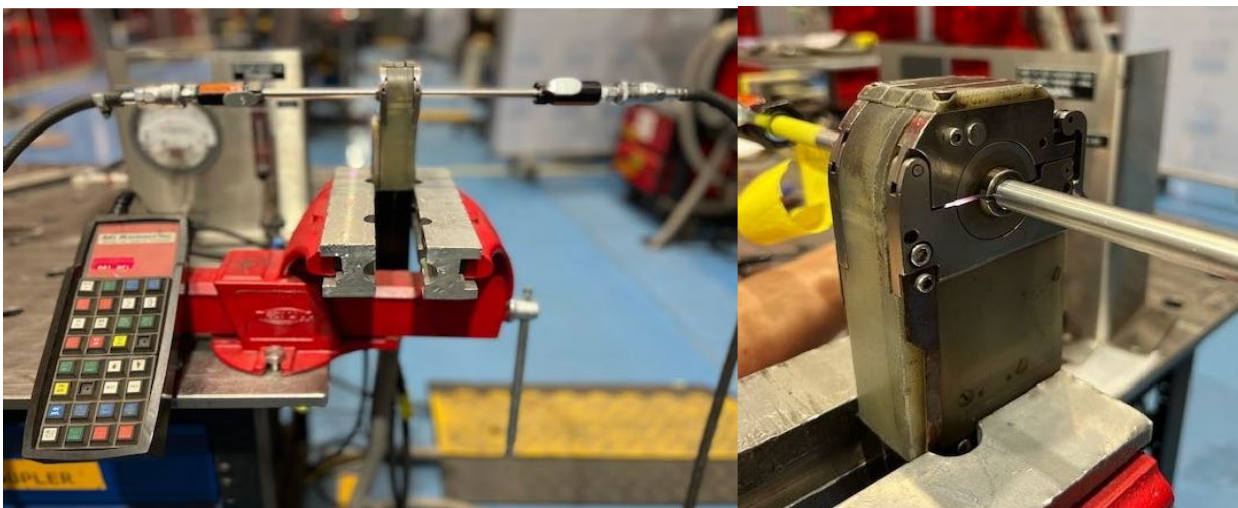


Figura 10: Representação do posicionamento do cabeçote orbital

Fonte: Autor (2023)

#### 4.2.3 Ponteamento

A Figura 11 ilustra a fonte de soldagem modelo Maxstar 280 (Miller) que foi utilizada para pontear os corpos de prova.

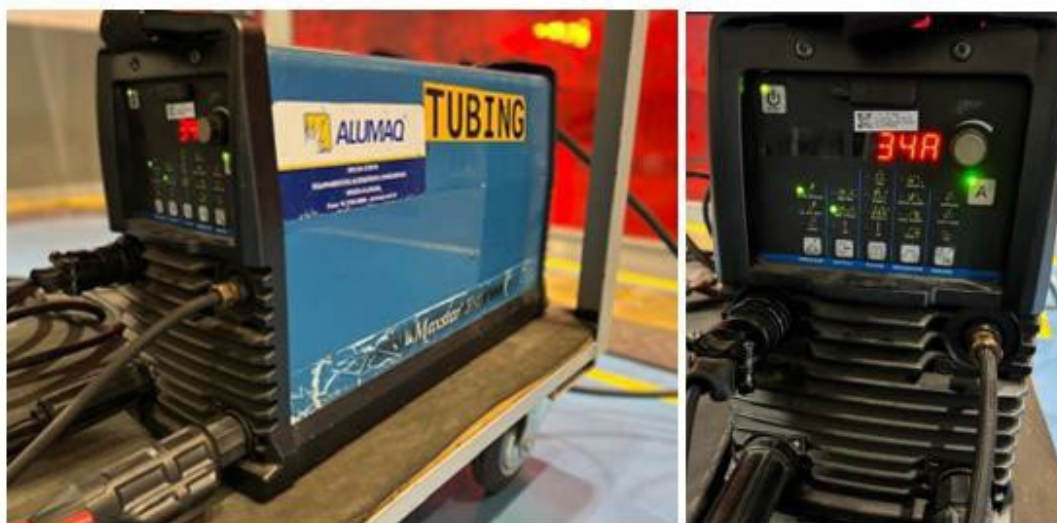


Figura 11: Fonte de soldagem Maxstar 280

Fonte: Autor (2023)

A programação da corrente pulsada com alta frequência conforme demonstrado na Figura 12.

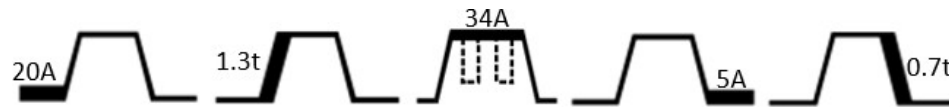


Figura 12: Programa corrente pulsada

Fonte: Autor (2023)

Corrente inicial de 20A com rampa de 1.3seg, corrente de soldagem TIG e corrente de pico durante a pulsação de 34A, rampa final de 5A com 0.7seg. Os mesmos parâmetros foram replicados para todos os corpos de prova testados. A Figura13 exibe a sequência do ponteamto manual. O ponto de início e fim foram marcados para que o passe cubra o ponto de solda.



Figura 13: Sequência do ponteamto

Fonte: Autor (2023)

#### 4.2.4 Soldagem dos Corpos de Prova

Para soldagem dos corpos de prova foi utilizada a fonte de soldagem Arc Machines Inc Model 227 conforme Figura 14.



Figura 14: Fonte de soldagem

Fonte: Autor (2023)

Sabendo se que a pressão da purga influencia diretamente no perfil da solda, pressão insuficiente do gás de purga produzirá junta côncava e pressão excessiva produzirá junta convexa, a mesma foi mantida em todos os corpos de provas realizados para que não influenciasse nos resultados. A Figura 15 mostra o sistema de purga associado ao manômetro diferencial.



Figura 15: Sistema de purga associado ao manômetro diferencial

Fonte: Autor (2023)

O eletrodo de tungstênio utilizado foi o EWLa-2 com diâmetro de 1,6mm, como mostra na Figura16. O eletrodo Nú de Tungstênio ou Walfrânio (nome de seu descobridor) com adição de 2% de Óxido de Lantânio é não consumível que atende a norma AWS A-5.12, tem um alto ponto de fusão a 3.410°C, que proporciona fácil ignição, boa abertura e estabilidade do arco com baixa taxa de vaporização em corrente contínua e corrente alternada. Indicado na soldagem de aços Carbono, Inoxidáveis, Níquel, Cobre, Titânio, Alumínio, Magnésio e suas ligas.



Figura 16: Aspecto do eletrodo de tungstênio

Fonte: Autor (2023)

Para avaliação do critério de aceitação das discontinuidades relacionadas a solda foi utilizado o procedimento X, conforme código ASME B31.3. Onde diz que, somente aceitável concavidade externa de 10% da espessura nominal, sendo no máximo 0,5mm, o que for menor desde que a espessura nominal seja mantida, e falta de fusão é inaceitável. Para verificação deste critério são utilizados os ensaios não destrutivos, visualize radiografia, conforme ASME V artigos 9 e 1.

O primeiro ensaio a ser realizado é o visual, onde é possível verificar a porcentagem da concavidade externa, e posteriormente o ensaio de radiografia para avaliar se espessura foi mantida com base na penetração, e avaliação dos demais critérios de penetração e fusão. A Figura 17 mostra um exemplo de concavidade externa.

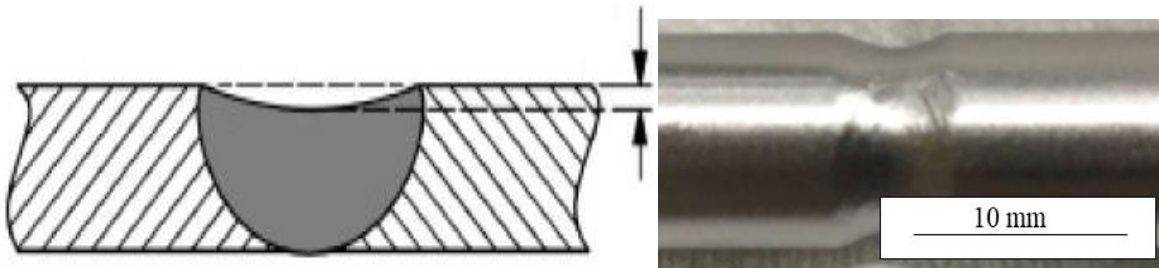


Figura 17: Concavidade externa

Fonte: Autor (2023)

Seguindo o critério de aceitação estabelecido internamente pela empresa, nesse teste o valor máximo aceitável é 0.165mm (0,006"), com base na espessura do corpo de prova (10% de 1.65mm). Para verificação desse valor no ensaio visual e dimensional, foi utilizado o relógio comparador conforme ilustrado na Figura 18.

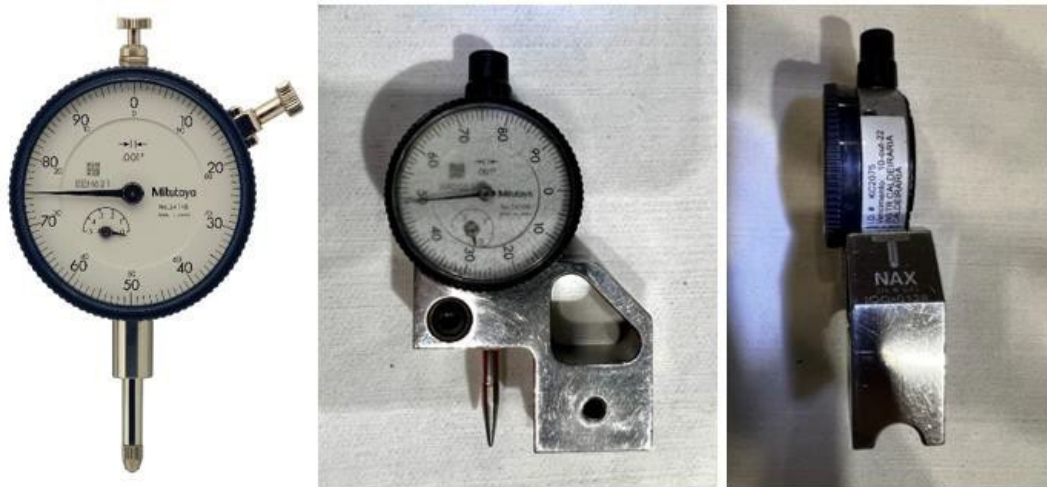


Figura 18: Relógio Comparador (precisão .001")

Fonte: Autor (2023)

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Soldagem dos corpos de prova

As amostras foram identificadas no relatório com as letras A, B e C dos seus respectivos fornecedores. Nos programas utilizados, foram mantidos como padrão, os tempos de cada nível,

os tempos de pico e de base para cada valor de corrente, conforme estabelecido na EPS.

**1º teste** realizado foi utilizado amostra do fornecedor C, seguindo os parâmetros de acordo com o descrito na Tabela 4. Estando os mesmos dentro dos limites estabelecidos pela EPS qualificada.

Tabela 4: Parâmetros do teste C

PROGRAMAS						
TESTES	Níveis	Tempo (seg)	Corrente primária (A)	Corrente secundária (A)	Tempo de pico (seg)	Tempo de base
1 - C	Nível 1	13	45	22	0.1	0.1
	Nível 2	7	42	22	0.1	0.1
	Nível 3	11	33	19	0.1	0.1
	Nível 4	5	33	19	0.1	0.1

Fonte: Autor (2023)

Foi utilizado os tempos dos níveis, e os tempos de pico e de base sem alteração em relação ao procedimento qualificado, fazendo apenas um ajuste na corrente primária, ficando dentro do limite estabelecido na EPS.

Resultado (1 - C): Foram soldados 4 corpos de provas, não havendo necessidade de ajuste de parâmetros, eles foram replicados para os demais CPs sem alteração, como mostra a Figura 19.

Concavidade encontrada, 0,005" ficando dentro do critério de aceitação no ensaio visual, como mostram as Figuras 20 e 21.



Figura 19: CPs soldados 1-C

Fonte: Autor (2023)



Figura 20: Visual dimensional com o relógio comparador

Fonte: Autor (2023)

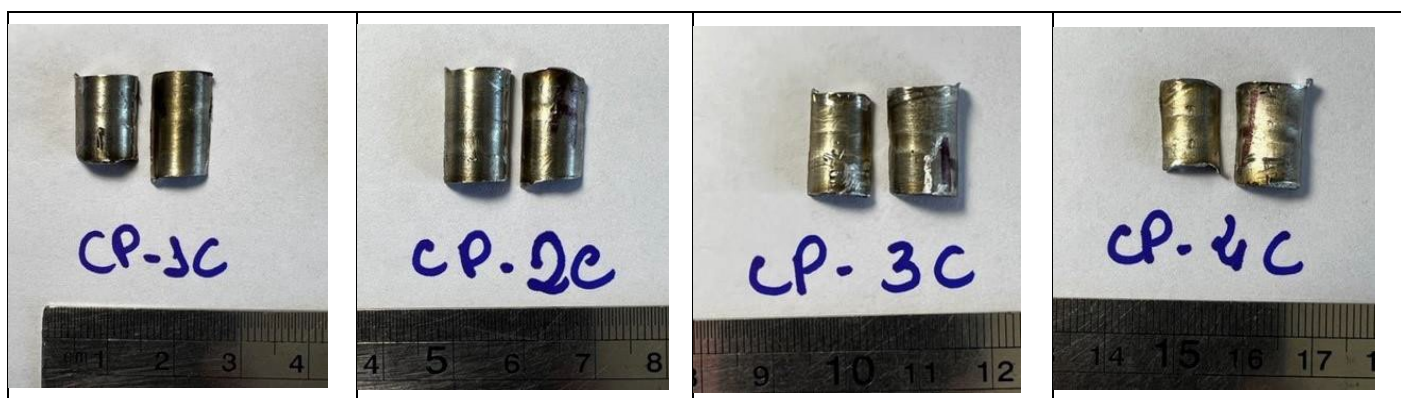


Figura 21: CPs- amostras retiradas dos 4CPs soldados

Fonte: Autor (2023)

**2º teste** foi utilizado a amostra do fornecedor B. Na soldagem do primeiro corpo de prova utilizamos o programa realizado no fornecedor C, porém não foi possível replicar, gerando concavidade externa no valor de 0.011", ficando fora do critério de aceitação. Veja na Figura 22.



Figura 22: Concavidade encontrada 0.011"

Fonte: Autor (2023)

Foi necessário realizar mais 3 corpos de provas para conseguir chegar o valor máximo de 0,006" (Figura 23), sendo necessário fazer ajustes da corrente de acordo com os valores em vermelho conforme descrito na Tabela 5. Os ajustes de corrente ficaram forma do discriminado na EPS, contudo, não comprometeu a variável essencial da energia de soldagem já que somente a corrente diminuiu.

Tabela 5: Parâmetros do teste B

PROGRAMAS						
TESTES	Níveis	Tempo (seg)	Corrente primária (A)	Corrente secundária (A)	Tempo de pico (seg)	Tempo de base
2 - B	Nível 1	13	38	21	0.1	0.1
	Nível 2	7	36	22	0.1	0.1
	Nível 3	11	30	19	0.1	0.1
	Nível 4	5	30	19	0.1	0.1

Fonte: Autor (2023)



Figura 23: Concavidade encontrada 0.005"

Fonte: Autor (2023)

**3º teste** foi utilizado a amostra do fornecedor A. A primeira tentativa foi realizando o programa do fornecedor C, e o resultado foi bem pior que o teste na amostra anterior com o fornecedor B, ficando com 0.018" de concavidade externa e conseqüentemente penetração excessiva. Ilustrada na Figura 24.

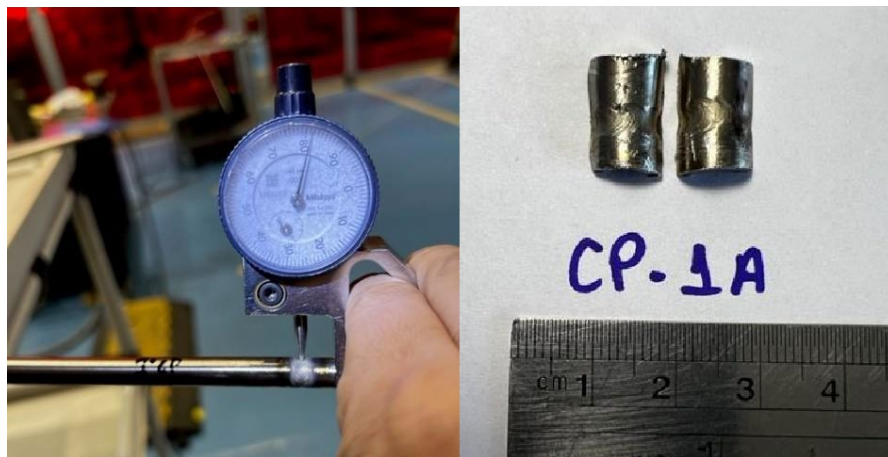


Figura 24: Concavidade encontrada 0.018"

Fonte: Autor (2023)

A segunda tentativa foi utilizada o mesmo programa da amostra B, e ainda assim ficou fora do critério de aceitação de concavidade (Figura 25). Com isso foi necessário ajustar a corrente primária e secundária mais 2 vezes até consegui o resultado satisfatório no critério de aceitação. O programa final 3 - A2 está relacionado na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros do teste A

PROGRAMAS						
TESTES	Níveis	Tempo (seg)	Corrente primária (A)	Corrente secundária (A)	Tempo de pico (seg)	Tempo de base
3 - A	Nível 1	13	35	20	0.1	0.1
	Nível 2	7	34	20	0.1	0.1
	Nível 3	11	29	19	0.1	0.1
	Nível 4	5	29	19	0.1	0.1
3 - A2	Nível 1	13	33	18	0.1	0.1
	Nível 2	7	30	18	0.1	0.1
	Nível 3	11	25	17	0.1	0.1
	Nível 4	5	25	18	0.1	0.1

Fonte: Autor (2023)



Figura 25: Concavidade encontrada 0.005"

Fonte: Autor (2023)

Em busca de ajuste dos parâmetros de correntes mais baixos para evitar a concavidade externa, acabou refletindo em outra descontinuidade, a falta de fusão, conforme identificada no ensaio de radiografia. CP-A4 reprovado com falta de fusão, conforme ilustrado na Figura 26. Isso demonstra o quanto o ajuste deve ser preciso para que não comprometa a qualidade da junta como todo, para que atenda todo critério de aceitação.

WPS	WPS REV.	WELDING PROCESS	WELDED JOINT OR TESTED AREA
X	A	GTAW-ORBITAL	A-4
FILM CLASS	WIRE/ESSENTIAL HOLE	WELDER (ROOT)	WELDER (CAP)
I	2	SM299	X
WELDER (FINISHING)	THICKNESS (mm)	REINFORCEMENT (mm)	DIAMETER (mm)
X	1,65	R	9,5
TECHNIQUE	Double Wall / Double View		
Results			
DISCONTINUITIES	EVALUATION	DIMENSION	POSITION
C - Lack of Fusion	R	5MM	A
DISCONTINUITIES	EVALUATION	DIMENSION	POSITION
N - No Defect	A	NA	B
DISCONTINUITIES	EVALUATION	DIMENSION	POSITION
N - No Defect	A	NA	C

Figura 26: Resultado do ensaio de radiografia do CP A4

Fonte: Autor (2023)

Para que pudesse suportar no estudo e demonstrar as diferenças e dificuldade em manter o programa previamente qualificado em fabricante de tubos distintos, foi realizado um teste inverso. A programação utilizada no 3º teste da amostra A foi replicada na amostra C do 1º teste, onde o resultado houve falta de fusão em todos os corpos de prova testados. A Tabela 7 exhibe os parâmetros do teste inverso, comprovando as diferenças na soldabilidade dos corpos de provas de diferentes fabricantes.

Tabela 7: Parâmetros do teste inverso

PROGRAMAS						
TESTES	Níveis	Tempo (seg)	Corrente primária (A)	Corrente secundária (A)	Tempo de pico (seg)	Tempo de base
4 - C2	Nível 1	13	35	20	0.1	0.1
	Nível 2	7	34	20	0.1	0.1
	Nível 3	11	29	19	0.1	0.1
	Nível 4	5	29	19	0.1	0.1

Fonte: Autor (2023)

## 6 DISCUSSÕES

### 6.1 Análise com diagrama de Schaeffler

Os diagramas constitucionais são uma importante ferramenta para a previsão da microestrutura da solda e da possibilidade de ocorrência de problemas na soldagem de aços inoxidáveis e destes com outros tipos de aços (MONDENESI, 2001). Com base no diagrama de Schaeffler foram verificados o  $Ni_{eq}$  e o  $Cr_{eq}$  de cada amostra de metal de base dos fabricantes de acordo com a composição química apresentadas nos certificados das matérias-primas, A ( $Ni_{eq}=14,51/ Cr_{eq}=20,78$ ), B ( $Ni_{eq}=14,46/ Cr_{eq}=20,97$ ), C ( $Ni_{eq}=12,40/ Cr_{eq}=23,03$ ). Conforme demonstrado na Figura 27 foi observado que a amostra C tem um percentual (%) maior de ferrita comprado com as amostras A e B.

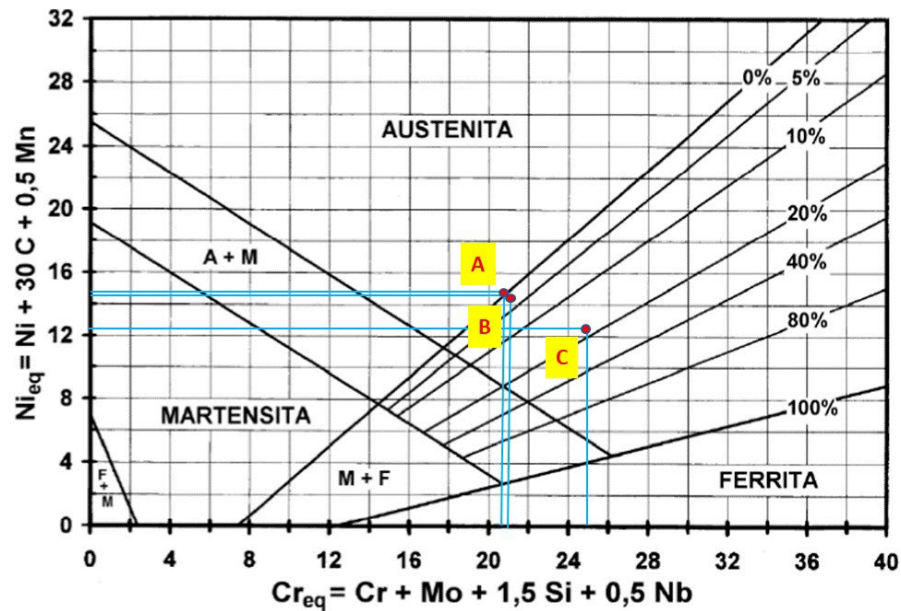


Figura 27: Diagrama de Schaeffler

Fonte: Autor (2023)

Para complementar a análise, as amostras soldadas foram analisadas em laboratório, onde também demonstrou que após a soldagem percentual de ferrita a amostra C apresentou um maior. Veja as comparações na Tabela 8.

Tabela 8: Comparações de contagem de ferrita do metal de solda

Amostra	Medidas (%)															
	Região do metal de solda															
	Face					Centro					Raiz					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10	11	12	13	14	15
CPA	3,09%	2,38%	-	3,66%	4,11%	3,18%	3,58%	3,80%	5,42%	3,46%	-	3,19%	3,72%	4,04%	2,85%	4,34%
CPB	8,61%	3,89%	6,73%	9,43%	5,44%	7,68%	6,47%	8,33%	7,19%	6,08%	4,87%	4,84%	4,64%	4,80%	4,28%	4,08%
CPC	10,73%	13,02%	12,47%	13,88%	9,14%	8,69%	14,53%	9,16%	9,26%	11,93%	-	13,01%	13,39%	10,03%	12,29%	12,22%

Fonte: P002-009/23

## 6.2 Composição química dos corpos de provas

Para suportar na análise, foi feito um comparativo entre as composições químicas de todos os corpos de provas utilizados durante os testes, conforme demonstrado na Tabela 9. Onde foi observado que estavam dentro dos critérios das normas ASTM A-213-19 AW, ASME SA-213-ED-19 AW, ASTM A-269-15<sup>a</sup>, e que as diferenças mais consideráveis entre um fabricante e o outro foram, o carbono mais baixo e o enxofre mais alto do fornecedor C, e algumas variações em outros elementos de liga como o titânio, alumínio.

Tabela 9: Comparações da composição química das amostras testadas

Amostra	Análise Química												
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	Ti	Al	N	Cu
	Carbono	Silício	Manganês	Fósforo	Enxofre	Cromo	Níquel	Molibdênio	Cobalto	Titânio	Alumínio	Nitrogênio	Cobre
A B	0,017	0,40	1,58	0,030	0,006	17,54	13,21	2,64				0,047	
C	0,018	0,48	1,57	0,026	0,0056	17,66	13,14	2,59		0,001	0,006		0,28
	0,013	0,36	1,57	0,024	0,0115	17,00	11,23	2,26		0,008	0,016		

Fonte: Autor (2023)

A forma da poça de fusão e, conseqüentemente, a sua penetração no metal de base é influenciada por quatro forças (Kou, 2003):

- Empuxo (diferença de densidades devido a diferentes temperaturas na poça de fusão);
- Força de Lorentz;
- Tensão cisalhante induzida pelo gradiente de tensão superficial na superfície da poça (efeito Marangoni reverso);
- Tensão cisalhante atuando na superfície da poça de fusão gerada pelo arco elétrico.

Para este estudo, apenas o efeito Marangoni reverso foi analisado, visto que as outras forças motrizes podem ser consideradas constantes na análise, exceto pela força de Lorentz, que aumenta com o aumento da energia do arco elétrico.

Os elementos S e O são agentes ativos para influenciar a tensão superficial em aços inoxidáveis. Isto quer dizer que a presença destes elementos em maior quantidade na poça de fusão altera o fluxo de metal líquido devido à diferença de tensão superficial nas regiões central e marginal da poça de fusão. A presença de S e O reverte a convecção de Marangoni, isto é, faz com que o fluxo de metal líquido tenha sentido da margem da poça de fusão para o centro e para baixo da poça de fusão, aumentando a penetração da junta soldada (Kou, 2003).

Embora o teor de enxofre da junta C seja maior que os das amostras A e B, para a faixa de teores de enxofre analisadas, isto é, entre 0,006 (60 ppm) e 0,012 (120 ppm), o fluxo de metal líquido na poça de fusão alterna entre da extremidade para o centro (maior penetração da junta) e do centro para extremidade (menor penetração da junta) (Wang, 2001). Esta alternância ocorre devido a variação da máxima tensão superficial com a temperatura. Como o processo de soldagem orbital requer bastante tempo (maior que 30 s) para terminar, a alternância do fluxo de metal para aço inoxidável com teor de enxofre entre 0,006 e 0,012 pode causar menor penetração nas regiões entre meio e final do cordão de solda.

### 6.3 Análise dos resultados (*Heat input*)

O aumento de energia de soldagem necessário para que a junta C apresente a mesma penetração que as juntas A e B pode ser explicado pela menor presença de oxigênio na poça de fusão da solda C. Conforme apresentado na Tabela 10, a amostra C apresentou uma energia de soldagem 28% acima da amostra A.

Para o cálculo da energia de soldagem foram utilizados como base a tensão 10v e velocidade 59,8mm/min constantes.

Tabela 10: Comparações do heat input das amostras testadas

Análise Heat input (energia de soldagem)									
Nível	Amostra: A			Amostra: B			Amostra: C		
	Corrente Pico	Corrente Base	HI [J/mm]	Corrente Pico	Corrente Base	HI [J/mm]	Corrente Pico	Corrente Base	HI [J/mm]
1	33	18	255,8528	38	21	295,9866	45	22	336,1204
2	30	18	240,8027	36	22	290,9699	42	22	321,0702
3	25	17	210,7023	30	19	245,8194	33	19	260,8696
4	25	18	215,7191	30	19	245,8194	33	19	260,8696
Média			<b>230,7692</b>			<b>269,6488</b>			<b>294,7324</b>
	1			17%			28%		

Fonte: Autor (2023)

Embora este estudo não tenha apresentado a análise química do teor de oxigênio no

produto, é possível observar que a amostra C possui maiores teores de Ti e Al, que são fortes formadores de óxido nos aços (Kou, 2003). O oxigênio é um elemento tenso ativo e contribui para que a poça de fusão apresente fluxo positivo, isto é, da margem para o centro da poça de fusão e com sentido para baixo, contribuindo para a maior penetração (Zhao, 2006). Zhao e colaboradores mostraram ainda que a temperatura da poça de fusão aumenta com o aumento do teor de oxigênio dissolvido e há um teor de oxigênio crítico que altera o fluxo de fluido da poça de fusão. Para correntes baixa, como neste trabalho, o teor de oxigênio crítico deve ser menor que 280ppm para que o fluxo de metal líquido permaneça conforme a convecção de Marangoni, isto é, do centro para a margem como menor penetração (Zhao, 2006). Portanto, a junta C precisa de mais energia de arco elétrico, aumentando também a força de Lorentz, para que a poça de fusão tenha maior penetração e possa fundir toda a espessura do tubo.

#### 6.4 Análise dos resultados de laboratório

Para ajudar na análise foram encaminhados ao laboratório TECMETAL as três amostras de tubos oriundos de diferentes fabricantes, para a caracterização metalográfica e realização de ensaios mecânicos, com objetivo de identificar qual característica na matéria-prima poderia estar contribuindo na necessidade de alteração da corrente de soldagem. Como consta na descrição, os tubos foram identificados como A, B e C decorrentes das mesmas amostras testadas na soldagem, manufaturados em aço inoxidável tipo AISI 316 / AISI 316L. As amostras enviadas conforme Figura 28.

Para caracterização dos materiais foram realizados os ensaios de análises metalográficas por microscopia ótica, medidas de micro dureza (carga de 100g) e ensaios de tração.

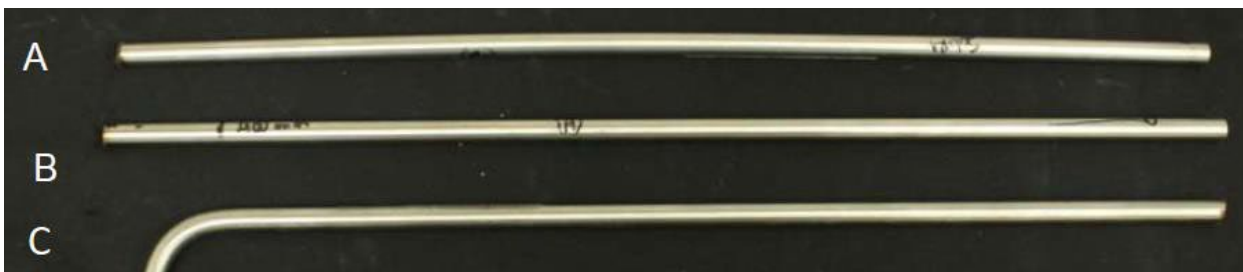


Figura 28: Aspecto como recebido das amostras dos tubos de diferentes fabricantes

Fonte: Relatório -RT 226/2022

##### 6.4.1 Metalográfica

Análises metalográficas por microscopia ótica conforme as normas ASTM E3-11

(R2017), ASTM E384-17 e ASTM A262-15 método (Figuras 29, 30 e 31).

#### 6.4.1.1 Amostra A

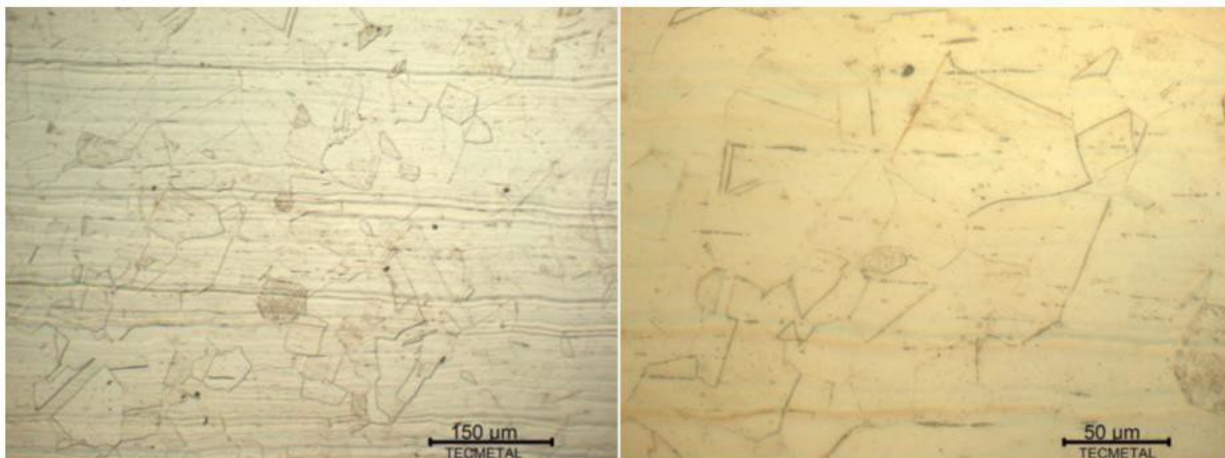


Figura 29: Aspecto micrográfico do tubo A com microestrutura austenítica. Ataque Oxálico

Fonte: Relatório - RT 226/2022

#### 6.4.1.2 Amostra B

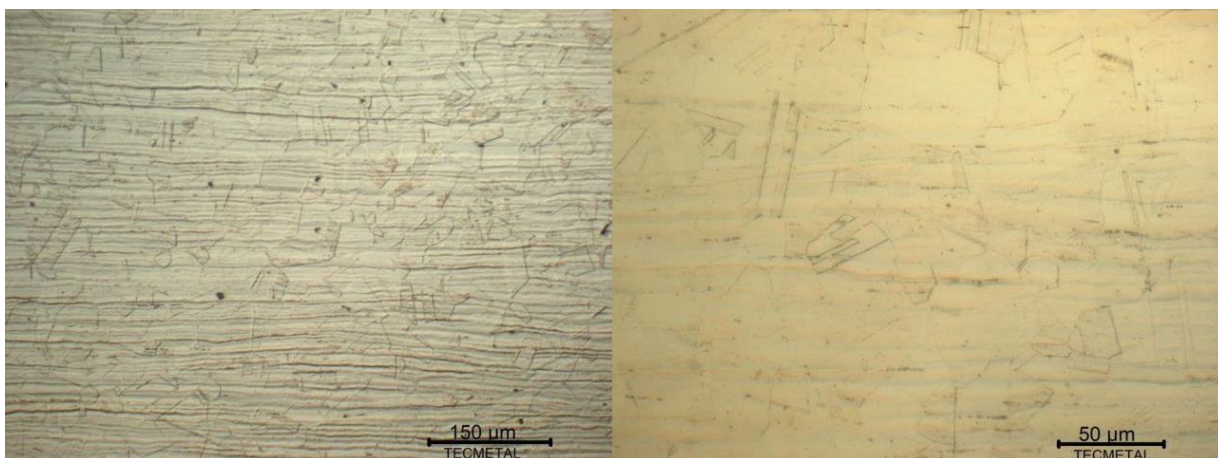


Figura 30: Aspecto micrográfico do tubo B

Fonte: Relatório - RT 226/2022

#### 6.4.1.3 Amostra C

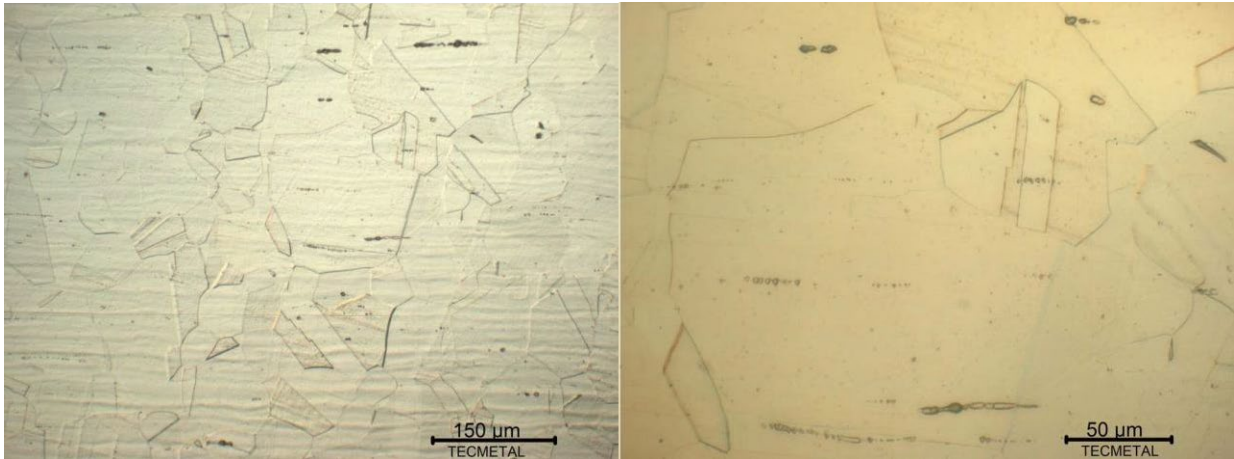


Figura 31: Aspecto micrográfico do tubo C

Fonte: Relatório - RT 226/2022

Resultado: As metalografias evidenciaram microestrutura austenítica, como esperado para esse tipo de aço inoxidável, sem evidências de sensitização, com maclas de recozimento e ferrita delta alongada.

#### 6.4.2 Ensaio de Tração

Ensaios de tração de acordo com a ASTM A370-21.

Resultado: Os ensaios de tração (Figura 32) evidenciaram tensão limite de escoamento variando entre 261 e 284 MPa, tensão limite de resistência variando entre 581 e 621 MPa, alongamento entre 52 e 64 % e a relação LE/LR, entre 0,44 e 0,46. As propriedades mecânicas indicam que os tubos foram solubilizados. Ver resultados detalhados na Tabela 11.

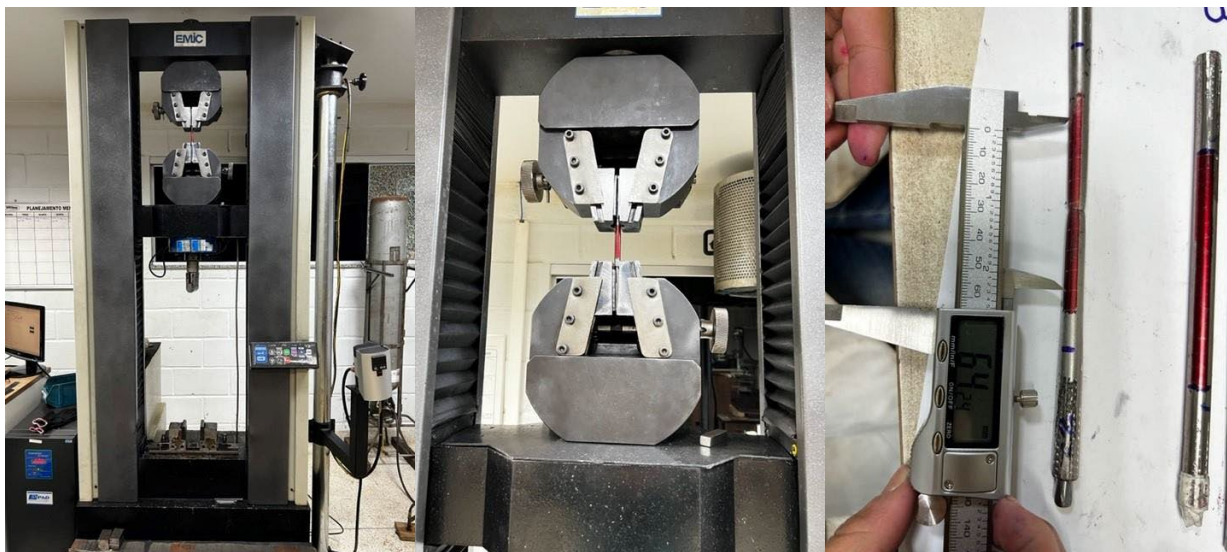


Figura 32: Ensaio de Tração

Fonte: Autor (2023)

Tabela 11: Resultado ensaio de tração

Amostra	Tensão Limite de Escoamento (MPa)	Tensão Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)	LE/LR
A – CP1	261	586	60	0,45
A – CP2	261	587	64	0,44
B – CP1	288	621	52	0,46
B – CP2	284	612	53	0,46
C – CP1	263	600	61	0,44
C – CP2	256	581	56	0,44

Fonte: Relatório - RT 226/2022

#### 6.4.3 Microdureza

Medidas de microdureza (carga de 100g) de acordo com ASTM E384-17. Aspecto micrográfico dos tubos com ataque Oxálico, conforme Figura 33.



Figura 33: Aspecto micrográfico dos tubos A, B e C.

Fonte: Relatório - RT 226/2022

Resultado: As medidas de microdureza foram realizados no centro da espessura na seção longitudinal dos tubos e foram obtidos valores médios de 178 HV100g, 185 HV100g e 191 HV100g para os fabricantes A, B e C, respectivamente, como mostra a Tabela 12.

Tabela 12: Medidas de Microdureza Vickers (carga de 100g)

Amostra	Medidas de Dureza (HRC)	Média
A	172 – 171 – 182 – 181 – 185	178 HV100g
B	184 – 187 – 178 – 185 – 189	185 HV100g
C	198 – 187 – 189 – 189 - 194	191 HV100g

Fonte: Relatório –RT 226/2022

Foi realizado um comparativo entre as durezas encontradas nas amostras, onde a amostra C demonstrou estar 7% maior entre as demais amostras. Fazendo uma análise em conjunto com análise micrografia, foi possível verificar que a amostra C apresentou mais macla, onde ocorre menor deformação, na amostra B com menor grão, mais deformado e a amostra A é o segundo mais deformado, apresentando um maior tamanho de grão.

## 7 CONCLUSÃO

Foi comprovado através de testes em corpos de prova que há diferença na soldabilidade de corpos de provas de diferentes fornecedores, contribuindo para o aumento de tempo de ajustes

que o operador leva na produção, acarretando impacto na qualidade e tempo da produção.

O trabalho apresentou que a soldagem de tubos de pequeno diâmetro é bem complexa e requer grande controle das matérias primas e do processo. Para que o processo de soldagem possa atingir melhor eficácia, levando em consideração os requisitos de concavidade externa e falta de fusão, foi observado que é necessário que o metal de base apresente quantidade mínima de desoxidantes (e.g. Ti e Al) ou quantidade máxima de oxigênio para evitar penetração em excesso mesmo com baixas intensidades de corrente de soldagem. O teor de enxofre precisa ser limitado a um máximo de 0,012, tendo em vista que até esta quantidade de enxofre, o comportamento da poça de fusão não se altera, mantendo todas as outras variáveis constantes.

Após a pesquisa, o trabalho sugere que se faça a separação da matéria-prima por fornecedor durante seu recebimento e manipulação na produção. É necessário também a padronização dos programas de acordo com os fornecedores do tubo. Além disso, é preciso requalificar a EPS de forma que todos os parâmetros de soldagem atendam as diversidades de fornecedores diferentes.

## REFERÊNCIAS

- ALTIERI, Welder Michael et al. Estudo da relação microestrutura/propriedades mecânicas e tratamento térmico dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 316l e 317l soldados pelo processo GTAW, em termos de ferrita delta. 2016.
- ANDREUCCI, Ricardo. Líquidos penetrantes. Abendi. São Paulo, 2013. ANDREUCCI, Ricardo. Radiologia industrial. Disponível na internet no site, 2003.
- ASME BPVC Section II Part A-1 2021 Ferrous Material Specifications (Beginning to SA-450)
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO - ABENDI. Processos de Fabricação – 1 a edição. São Paulo: Cromosete Gráfica e Editora LTDA, 2012.
- ASTM A 269 Standard Specification for Seamless and Welded Austenitic Stainless Steel Tubo for General Service
- ASTM A262-15 método A ASTM A370-21
- ASTME3-11 (R2017) ASTM E384-17
- BRACARENSE, Alexandre Q., Processo de Soldagem TIG – GTAW. Belo Horizonte, MG. UFMG, 2000.
- BRYMAN, Alan. Research methods and organization studies. Routledge, 2003.
- CARBÓ, Hector Mario. Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações. São Paulo: ArcelorMittal Brasil, v. 29, 2008.
- CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos: Características Gerais. Tratamentos Térmicos, Principais Tipos, 1996.
- DE MORAES SPERB, Israel; DE LIMA NUNES, Fabiano; PIRAN, Fabio Antonio Sartori. ANÁLISE DA VIABILIDADE FINANCEIRA DA UTILIZAÇÃO DE SOLDAGEM ORBITAL EM MANUTENÇÃO: UM ESTUDO DE CASO. Latin American Journal of Business Management, v. 9, n. 1, 2018.Ed. São Paulo, SP: Edgard Blucher, 2006.
- GIL, Antonio Carlos et al. Como elaborar projetos de pesquisa. São Paulo: Atlas, 2002.
- GUIDE TO MATERIALS SELECTION AND CORROSION CONTROL FOR SUBSEA ENERGY EQUIPMEN. Volume 194. Engineering Equipment & Materials Users Association, 2019.

KHAN, S. H. et al. Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reduction. *Computational Materials Science*, v. 43, n. 4, p. 623-628, 2008.

LEITE, P. P. G; 1996, “Curso de Ensaio não Destrutivos”. ABM, São Paulo / SP.

LOPES, Wellington. Estudo do encruamento dos aços AISI 304 e AISI 409 com uso da técnica de cisalhamento planar simples. 2009.

MACHADO, Paulo Jorge Bilro. **Avaliação da resistência estrutural de juntas soldadas de um quadro de uma bicicleta**. 2010. Tese de Doutorado. Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Setúbal.

MANNION, Bernard. The fundamentals of orbital welding. *Welding Design and Fabrication (USA)*, v. 72, n. 2, p. 22-24, 1999.

MARQUES, Paulo Villani. **Soldagem-fundamentos e tecnologia**. Editora UFMG, 2005.

MATTAR, Fauze Najib. Pesquisa de marketing: metodologia, planejamento. 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2005.

MICHEL, Maria Helena. Pesquisa e metodologia científica. *Metodologia e pesquisa científica em ciências sociais*. São Paulo: Atlas, p. 31-74, 2005.

MIX, Paul E. Introduction to nondestructive testing: a training guide. John Wiley & Sons, 2005.

MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.; MARQUES, P. V. Soldagem-Fundamentos e tecnologia; 3ª edição. Editora UFMG–Belo Horizonte, p. 205-217, 2009.

MODENESI, Paulo J. A química da formação do cordão na soldagem TIG. *Soldagem & Inspeção*, v. 18, p. 287-300, 2013.

MODENESI, Paulo J. Soldabilidade dos aços inoxidáveis. São Paulo, Senai-SP, p. 21-48, 2001.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. Introdução à metalurgia da soldagem. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

OLIVEIRA, Damião Gomes. Ensaio não destrutivos: Fundamentos e Aplicações. 2019.

OLIVEIRA, Jéssica Machado de. Caracterização de peça em aço inox 316L fabricada por manufatura aditiva (DMLS). 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

ORLOWSKI DE GARCIA, Jose Augusto et al. Desenvolvimento da Tecnologia de Soldagem do

Titânio pelo Processo TIG Orbital no Segmento Aeroespacial Brasileiro-Parte 2: Caracterização das Juntas Soldadas. Soldagem & Inspeção, p. 107-114, 2007.

PETROBRAS N-1738 – Descontinuidades em juntas soldadas, fundidos, forjados e laminados. Julho/2003

PETROBRAS, 2019. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossasatividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>>. Acesso em: 20 junho 2023.

PETROBRAS. Nossas Atividades, 2018. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principaisoperacoes/gasodutos/>>. Acesso em: 20 junho 2023.

QUIVY, Raymond. Campenhoudt, (1992). Manual de investigação em ciências sociais, v. 2, 2000.

SALLEH, Lokman. Orbital (Fusion) Welding for Small Bore Pipes. In: Offshore Technology Conference Asia. OTC, 2014. p. OTC-25061-MS.

SAMPAIO, Marcus Vinicius Cruz. Aplicação da inspeção não intrusiva em equipamentos do sistema de dessulfurização de gás natural da plataforma de pampo. 2009.

SANTIN, Jorge Luiz. Ultra-som: técnica e aplicação. Artes Gráficas e Editora Unificado, 2003.

SARTORI, Francisco et al. Uma análise comparativa entre diferentes versões de variantes modernas do processo MIG/MAG para o passe de raiz em soldagem orbital. Soldagem & Inspeção, v. 22, p. 442-452, 2017.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. Aços e ligas especiais. 2.

SILVA, Matuzalém Godoi; JESUS, Robson Pires JESUS; DE PAULA SILVA, Wilson. ESTUDO COMPARATIVO DE SOLDAGEM ENTRE OS PROCESSOS TIG ORBITAL AUTOMATIZADO E O PROCESSO TIG MANUAL EM TUBOS DE AÇO INOXIDÁVEL

AISI 316L. Anais do SIMPÓSIO NACIONAL DE CIÊNCIAS E ENGENHARIAS (SINACEN), v. 5, n. 2, p. 36-56, 2020.

SOLTEC. Metarlugia-Soldagem. Soldas Brasil, 2023. Disponível em: <<https://www.soldasbrasil.com.br/>>. Acesso em: 16, junho e 2023.

STEIN, Rafael Mattos. Estudo da técnica de ensaio não-destrutivo ultrassom PhasedArray. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -Universidade Federal do Espírito Santo, Faculdade de Engenharia Mecânica. Vitória–ES, 2017.

The Fabricator. Making joint design, equipment choices for successful orbital GTAW, and 2015. Disponível em:<<https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/tubepipefabrication/making-joint-design-equipment-choices-for-successful-orbital-gtaw>>. Acesso em: 24 julho 2023.

THIOLLENT, Michel. Repensando a pesquisa participante. São Paulo: Brasiliense, 1985.

TSCHIPTSCHIN, André Paulo; PINEDO, Carlos Eduardo. Estrutura e propriedades do aço inoxidável austenítico AISI 316L Grau ASTM F138 interestado sob plasma à baixa temperatura. Rem: Revista Escola de Minas, v. 63, p. 137-141, 2010.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; DE MELLO, Fabio Decourt Homem. Soldagem: processos e metalurgia. Editora Blucher, 1992.

WANG, Y.; SHI, Q.; TSAI, Hai-Lung. Modeling of the effects of surface-active elements on flow patterns and weld penetration. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 32, p. 145-161, 2001.

ZHAO, Yuzhen; SHI, Yaowu; LEI, Yongping. The study of surface-active element oxygen on flow patterns and penetration in A-TIG welding. **Metallurgical and materials transactions B**, v. 37, p. 485-493, 2006.