

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**INFLUÊNCIA DO FLUXO NA PENETRAÇÃO E
FORMAÇÃO DA FERRITA NA SOLDA ORBITAL NO AÇO
INOXIDÁVEL UNS S32750**

Sendy Aparecida Vitor Pereira

Silvio Junior Ribeiro

Pindamonhangaba - SP

2023

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**INFLUÊNCIA DO FLUXO NA PENETRAÇÃO E
FORMAÇÃO DA FERRITA NA SOLDA ORBITAL NO AÇO
INOXIDÁVEL UNS S32750**

Sendy Aparecida Vitor Pereira

Silvio Junior Ribeiro

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba para a graduação no Curso Superior de Tecnologia em Processos de Soldagem.

Orientador(a): Prof. Ma. Lúcia de Almeida Ribeiro.

Pindamonhangaba - SP

2023

P436i Pereira, Sendy Aparecida Vitor.
Influência do Fluxo na Penetração e Formação da Ferrita na Solda
Orbital no Aço Inoxidável UNS / Sendy Aparecida Vitor Pereira; Silvio
Junior Ribeiro / FATEC Pindamonhangaba, 2023.

58f.; il.

Orientadora: Professora Me. Lucia de Almeida Ribeiro
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia
de Pindamonhangaba. 2023

1. UNS S32750. 2. Aço Inoxidável Super Duplex. 3. Soldagem
Orbital. 4. Fluxo de Solda. 5. Ferrita. 6. Corrosão. I. Pereira, Sendy
Aparecida Vitor. II. Ribeiro, Silvio Junior. III. Ribeiro, Lucia de Almeida.
IV. Título.

CDD 621

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

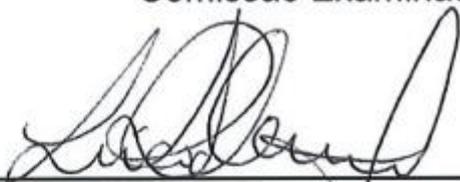
**INFLUÊNCIA DO FLUXO NA PENETRAÇÃO E
FORMAÇÃO DA FERRITA NA SOLDA ORBITAL NO AÇO
INOXIDÁVEL UNS S32750**

Sendy Aparecida Vitor Pereira

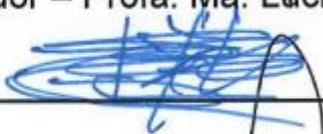
Silvio Junior Ribeiro

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba para a graduação no Curso Superior de Tecnologia em Processos de Soldagem.

Comissão Examinadora



Orientador – Profa. Ma. Lucia de Almeida Ribeiro



Membro – Prof. Me. Cristian Cley Parteniani Rita



Membro – Eng. Jardel Rosalino de Oliveira

Pindamonhangaba, 16 de Junho de 2023.

DEDICATÓRIA

SENDY APARECIDA VITOR PEREIRA

Agradeço a Deus que me deu forças para concluir este projeto de forma satisfatória.

À professora Lúcia de Almeida Ribeiro pela sua atenção dedicada ao longo de todo o projeto.

Esta monografia é dedicada aos meus pais, pilares da minha formação como ser humano.

Este trabalho de pesquisa é dedicado ao meu noivo Matheus Giuliano Jesus Belloni. Desde que você passou a fazer parte da minha vida, vivencio um mar de inspirações. Esta é uma das muitas conquistas ao seu lado.

SILVIO JUNIOR RIBEIRO

Dedico este trabalho a Deus. Sem ele nada seria possível.

Ao professor Cristian Cley Patterniani Rita que me auxiliou na germinação dos ensaios durante todo o processo prático deste presente projeto.

Agradeço aos meus pais pelo apoio incondicional em todos os momentos difíceis da minha trajetória acadêmica. Este trabalho é dedicado a eles.

Dedico esta monografia a minha esposa Ilza Toledo dos Santos que deu todo o suporte para que eu pudesse desenvolver este projeto, que só foi possível através de seu apoio e suporte. Dedico esta pesquisa a ela e ao meu filho Miguel Dias Todelo Ribeiro, pela sua compreensão á minha ausência durante a trajetória do curso.

AGRADECIMENTOS

SENDY APARECIDA VITOR PEREIRA

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho e confiaram no sucesso do projeto.

Aos meus pais Edino da Silva Pereira e Cristiane Vitor e meus irmãos Robson Leandro Vitor da Conceição e Sophya Aparecida Vitor Pereira que me incentivaram para a conclusão desta faculdade e ao meu noivo Matheus Giuliano Jesus Belloni por todo apoio nos momentos difíceis.

A professora Lúcia de Almeida Ribeiro pelo inestimável apoio na orientação deste trabalho.

SILVIO JUNIOR RIBEIRO

A todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho. A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

Às pessoas com que convivi ao longo desses anos de curso, que me incentivaram e que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica.

Aos professores, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

PEREIRA, S. A. V; RIBEIRO, S. J. **Influência do Fluxo na Penetração e Formação da Ferrita na Solda Orbital no Aço Inoxidável UNS S32750.** 2023. 58p. Trabalho de Graduação (Mecânica – Processos de Soldagem). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2023.

RESUMO

A presente pesquisa tem como material de estudo o aço inoxidável UNS S32750, que é uma liga metálica que alia uma excelente resistência à corrosão com altos valores de resistência mecânica, características atribuídas à microestrutura bifásica composta por ferrita e austenita. A aplicação deste aço para esta pesquisa é em equipamentos submarinos de extração de petróleo, mais especificamente em linhas hidráulicas, que são as responsáveis por fazer a atuação das válvulas, atuadores, cilindros e filtros presentes na estrutura. O intuito é comprovar a influência da utilização do fluxo na soldagem TIG orbital automatizada deste aço considerando como pontos principais a formação de ferrita na microestrutura do cordão e a penetração da solda. O fluxo tem como principal função potencializar a penetração da solda sem que seja necessário aumentar a corrente, reduzindo a temperatura durante a soldagem. Após a eliminação deste componente busca-se verificar a necessidade de alteração da amperagem para se obter a mesma penetração da solda de quando o fluxo é utilizado e verificar também a influência do mesmo na formação de ferrita na superfície da solda. O aço inoxidável UNS S32750 possui alta resistência à corrosão, que pode ser afetada pela porcentagem de ferrita na microestrutura, por isso é extremamente importante controlar a formação desta estrutura, considerando sua aplicação em equipamentos submarinos em meios agressivos.

Palavras-chave: UNS S32750, aço inoxidável super duplex, soldagem orbital, fluxo de solda, ferrita, penetração e corrosão.

PEREIRA, S. A. V; RIBEIRO, S. J. **Influence of flux on the penetration and formation of ferrite in orbital welding on stainless steel UNS S32750**. 2023. 58p. Graduation Work (Mechanics – Welding Processes). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2023.

ABSTRACT

The present research has UNS S32750 stainless steel as study material, which is a metal alloy that combines excellent corrosion resistance with high mechanical strength values, characteristics attributed to the biphasic microstructure composed of ferrite and austenite. The application of this steel for this research is in subsea oil extraction equipment, more specifically in hydraulic lines, which are responsible for actuating the valves, actuators, cylinders and filters present in the structure. The aim is to prove the influence of the use of flux in automated orbital TIG welding of this steel, considering as main points the formation of ferrite in the microstructure of the bead and penetration of the weld. The main function of the flux is to enhance solder penetration without the need to increase the current, reducing the temperature during soldering. After eliminating this component, it is necessary to verify the need to change the amperage to obtain the same solder penetration as when flux is used and also to verify its influence on the formation of ferrite on the solder surface. UNS S32750 stainless steel has high resistance to corrosion, which can be affected by the percentage of ferrite in the microstructure, so it is extremely important to control the formation of this structure, considering its application in subsea equipment in aggressive media.

Keywords: UNS S32750, superduplex stainless steel, orbital welding, solder flux, ferrite, penetration and corrosion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Árvore de Natal Molhada (ANM).....	20
Figura 2 - Conexões Hidráulicas.....	21
Figura 3 - Funcionamento da soldagem TIG.....	22
Figura 4 - Bloco de Fixação.....	23
Figura 5 - Cabeçote para soldar.....	23
Figura 6 - Fixação do cabeçote no bloco.....	24
Figura 7 - Fluxo para solda.....	25
Figura 8 - Microestrutura Ferrítica.....	25
Figura 9 - Serra de Fita Starrett.....	27
Figura 10 - Faceadora Swagelok.....	28
Figura 11 - Mini Retífica Dremel.....	28
Figura 12 - Limpeza interna do tubo.....	29
Figura 13 - Limpeza externa do tubo.....	29
Figura 14 - Máquina de Soldagem Orbital Swagelok M200.....	30
Figura 15 - Regulagem do Gás de Purga.....	31
Figura 16 - Posicionamento no Bloco de Fixação.....	31
Figura 17 - Posicionamento das amostras no Bloco.....	32
Figura 18 - Acoplamento do Cabeçote no Bloco de Fixação.....	33
Figura 19 - Programa de Ponteamento.....	33
Figura 20 - Amostra Ponteada.....	34
Figura 21 - Passe de Selagem.....	35
Figura 22 - Amostra Passe de Selagem.....	35
Figura 23 - Aplicação do Fluxo.....	36
Figura 24 - Passe Final.....	37
Figura 25 – Amostra Passe Final.....	37
Figura 26 - Amostra após limpeza.....	39
Figura 27 - Ferritoscópio Fischer.....	40
Figura 28 - Medição da Porcentagem de Ferrita.....	40
Figura 29 - Amostras Cortadas.....	41
Figura 30 - Embutidora Arotec.....	42
Figura 31 - Amostras Embutidas.....	42
Figura 32 - Lixa de Fita Baldan LFH – 2.....	43
Figura 33 - Lixadeira Circular Arotec.....	43
Figura 34 - Politriz Circular Arotec.....	44
Figura 35 - Fonte CTRL TECH.....	45
Figura 36 - Ataque Eletrolítico.....	46
Figura 37 - Estereoscópio Olympus.....	46
Figura 38 - Microscópio Óptico.....	47
Figura 39 - CP 01 Macro 6,7X.....	48
Figura 40 - CP 02 Macro 6,7X.....	48
Figura 41 - CP 03 Macro 6,7X.....	49
Figura 42 - Metal Base: A)500X B)1000X.....	50
Figura 43 - CP 01 ZTA: A)50X B)100X.....	50
Figura 44 - CP 01 Solda A)500X B)1000X.....	51
Figura 45 - CP 02 ZTA A)50X B)100X.....	52
Figura 46 - CP 02 Solda A)500X B)1000X.....	52
Figura 47 - CP 03 ZTA A)50X B)100X.....	53
Figura 48 - CP 03 Solda A)500X B)1000X.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química dos principais aços inoxidáveis.....	16
Tabela 2 - Comparação entre as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis duplex com as ligas austeníticas.....	17
Tabela 3 - Propriedades físicas.....	18
Tabela 4 - Correntes Utilizadas.....	38
Tabela 5 - Medição da Concentração de Ferrita.....	41
Tabela 6 – Parâmetros do Ensaio.....	45

LISTA DE ABREVIACÕES

AIA	Aços Inoxidáveis Austeníticos
AID	Aços Inoxidáveis Duplex
AIF	Inoxidáveis Ferríticos
AIM	Aços Inoxidáveis Martensíticos
AIPH	Aços Inoxidáveis Endurecidos por Precipitação
AISD	Aços Inoxidáveis Superduplex
ANM	Árvore de Natal Molhada
BAP	Base Adaptadora de Produção
CP	Corpo de Prova
GTAW	Gas Tungsten Arc Weld
IWC	Inch Water Column
MB	Metal Base
PH	Potencial Hidrogeniônico
TIG	Tungsten Inert Gas
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	PROBLEMA	14
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo Geral.....	14
1.2.2	Objetivos Específicos	15
1.3	JUSTIFICATIVA	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX	16
2.1.1	PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E QUÍMICAS DOS AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX.....	17
2.1.2	APLICAÇÕES DOS INOXIDÁVEIS DUPLEX NA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA	19
2.2	UNIÃO DE LINHAS HIDRÁULICAS	20
2.2.1	SOLDAGEM TIG ORBITAL AUTOMATIZADA	21
2.3	IMPORTÂNCIA DA FERRITA E AUSTENITA NA MICROESTRUTURA	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	MATERIAIS.....	27
3.2	MÉTODOS.....	27
3.2.1	ATAQUE ELETROLÍTICO	44
4	RESULTADOS	48
5	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

O aço inoxidável é uma liga metálica de produção recente quando comparada a outros aços e materiais metálicos. Trata-se de material que foi descoberto em 1913 pelo metalurgista inglês Harry Brearley, o qual fora requisitado, por um fabricante de armas, para que desenvolvesse um material que apresentasse boa resistência ao desgaste que era observado no interior dos canos das armas de fogo produzidas na época, as quais verificavam-se sofrer desgaste por conta do calor liberado por gases provenientes do mecanismo de explosão dos projéteis. (SOUZA, 2021).

Tendo em vista que a adição de cromo ao aço aumenta a temperatura de fusão deste material quando comparado aos aços carbonos comuns, Brearley desenvolveu um aço com alto teor de cromo, o qual ao realizar o ataque químico para revelar a microestrutura deste aço desenvolvido, Brearley pôde notar que o material não sofria influência alguma do ácido nítrico, que é um reagente químico comumente usado no ataque químico de inúmeros aços. Assim, Brearley observou que tal aço não era resistente ao desgaste, mas era resistente à corrosão. Surgia o então chamado “aço antiferrugem” (do inglês “*rustless steel*”), que mais tarde viria a ser chamado “aço que não mancha” (do inglês “*stainless steel*”), atualmente conhecido como “aço inoxidável”. (SOUZA, 2021).

Este aço comumente conhecido de forma geral como “Aço Inox” apresenta, na verdade, uma gama de subdivisões que são classificadas de acordo com a microestrutura do material. Dentre elas pode-se destacar os aços Inoxidáveis Ferríticos (AIF), os Aços Inoxidáveis Austeníticos (AIA), os Aços Inoxidáveis Martensíticos (AIM), os Aços Inoxidáveis Endurecidos por Precipitação (AIPH), Aços Inoxidáveis Duplex (AID) e os Aços Inoxidáveis Superduplex (AISD), sendo esta última a ser abordada neste estudo.

Os aços inoxidáveis superduplex são aços que aliam uma excelente resistência à corrosão com altos valores de resistência mecânica, além de possuírem elevada tenacidade ao impacto. Estas características são atribuídas a uma fina microestrutura bifásica composta por Ferrita e Austenita presentes em proporções semelhantes. A presença da fase ferrítica confere um aumento considerável do limite de resistência mecânica e da resistência à corrosão sob tensão nestes aços, quando comparados com os inoxidáveis austeníticos. (PARDAL,

2009).

Esta liga metálica é composta por dois elementos principais: Ferro (Fe) e Cromo (Cr), e alguns outros elementos de liga como o molibdênio (Mo) e níquel (Ni), que também auxiliam na obtenção de sua grande vantagem quando comparada com outros aços, a resistência à corrosão.

O aço inoxidável superduplex é amplamente utilizado nas indústrias em geral por suas características anticorrosivas. O presente estudo foi baseado na aplicação em tubulações para instrumentação, que de acordo com Chaves (2002) pode ser definida como a ciência que aplica e desenvolve técnicas para medidas e controles em equipamentos e processos industriais, para deste modo fazer a adequação de instrumentos de medição, transmissão, indicação, registro e controle de variáveis físicas, neste caso aplicados em equipamentos de extração de petróleo para fazer a atuação em válvulas, atuadores, cilindros e filtros.

Contudo, com a complexidade dos diagramas hidráulicos se faz necessária a união destas linhas tanto com a utilização de conexões convencionais quanto com a utilização do processo de soldagem TIG orbital automatizada, voltada para união de tubulações com diâmetros específicos.

Na soldagem TIG orbital em aços inoxidáveis superduplex é necessária a utilização de um pó para solda chamado de “fluxo”, este componente aumenta a temperatura da poça de fusão, fazendo com que a amperagem fornecida pela fonte possa ser menor. Será abordado posteriormente a influência do fluxo na penetração da solda e na formação da ferrita na superfície da solda, que são as variáveis que serão estudadas nesta pesquisa.

1.1 PROBLEMA

É possível que a ausência do fluxo na soldagem orbital altere a penetração e a quantificação de ferrita na microestrutura da solda?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a influência do fluxo na penetração da solda e na formação de ferrita utilizando o processo de soldagem orbital no aço inoxidável superduplex UNS S32750.

1.2.2 Objetivos Específicos

A fim de atingir o objetivo geral, a pesquisa desdobra-se nos seguintes objetivos específicos:

- Soldagem orbital de três corpos de prova, o primeiro utilizando o fluxo e os parâmetros recomendados, o segundo sem a aplicação do fluxo e o terceiro sem a aplicação do fluxo e alterando a corrente.
- Análise microestrutural dos cordões realizados.

1.3 JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa busca analisar a influência da utilização do fluxo na soldagem orbital considerando como pontos principais a formação de ferrita na microestrutura do cordão e a penetração da solda.

O fluxo tem como principais funções aumentar a temperatura da poça de fusão e conseqüentemente reduzir a área de formação da zona termicamente afetada (ZTA). Após a eliminação deste componente busca-se verificar a necessidade de alteração da amperagem para se obter a mesma penetração da solda quando o fluxo é utilizado e verificar também a influência do mesmo na formação de ferrita na superfície da solda.

Como dito anteriormente, o aço inoxidável superduplex possui alta resistência a corrosão, que pode ser afetada pela porcentagem de ferrita na microestrutura, por isso é extremamente importante controlar a formação desta estrutura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX

Aço inoxidável duplex é o nome dado à classe de materiais com microestrutura bifásica, composta por uma matriz ferrítica e ilhas de austenita, com frações volumétricas de, aproximadamente, 50% de cada fase. (DAVIS, 1996).

Os diferentes tipos de aços inoxidáveis duplex são, usualmente, separados em três grupos, com relação à composição química:

a) Aços inoxidáveis duplex de baixa liga: devido ao menor teor de elementos de liga são materiais econômicos, não possuem molibdênio na composição química e podem substituir aços inoxidáveis austeníticos como TP304L/ 316L. Uma qualidade utilizada é o UNS S32304 (SAF 2304). (SENATORE; FINZETTO; PEREA, 2007).

b) Aços inoxidáveis duplex de média liga: nessa família, enquadram-se os duplex mais utilizados. A qualidade típica é o UNS S31803 (SAF 2205). Apresentam resistência à corrosão intermediária entre os austeníticos comuns TP304L/ 316L e aços inoxidáveis superausteníticos com 5 e 6% de molibdênio. (SENATORE; FINZETTO; PEREA, 2007).

c) Aços inoxidáveis duplex de alta liga: comumente designados por superduplex. O UNS S32750 (SAF 2507) apresenta elevada resistência à corrosão comparável aos superausteníticos que possuem entre 5 e 6% de molibdênio. (SENATORE; FINZETTO; PEREA, 2007).

Na Tabela 1, são apresentados os principais tipos de aços inoxidáveis, com destaque para os duplex UNS S32304, S31803 e S32750 (SAF - Sandvik Austenitic Ferritic; 2304, 2205 e 2507) e suas respectivas composições químicas. (WALDÉN, B., NICHOLLS, J.M, 1994).

Tabela 1 - Composição química dos principais aços inoxidáveis

AISI/UNS	%C máx	% Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%N	%Cu	Microestrutura
304L	0,03	0,5	1,3	18,5	10	-	-	-	Austenita
316L	0,03	0,4	1,7	17,5	13	2,6	-	-	Austenita
S 32304	0,03	0,5	1	23	4,5	-	0,1	-	Duplex
S 31803	0,03	1	2	22	5,5	3,2	0,18	-	Duplex
S 32750	0,03	0,8	1,2	25	7	4	0,3	-	Duplex

Fonte: Waldén, B., Nicholls, J.M, 1994.

Nesta tabela pode-se observar que o aço inoxidável UNS S32750 possui a maior porcentagem de cromo, de 25%, que é responsável pelas características mecânicas mencionadas, enquanto o molibdênio tem concentração de 4%, maior do que as outras ligas apresentadas, que é o responsável pela resistência a corrosão.

2.1.1 PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E QUÍMICAS DOS AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX

A combinação entre os elevados valores de alongamento da austenita com o elevado limite de escoamento da ferrita nos aços inoxidáveis duplex, forma um conjunto de notáveis propriedades mecânicas. Os aços inoxidáveis duplex apresentam elevado limite de escoamento, na ordem de duas vezes o valor dos aços austeníticos. (NILSSON, J.- O, 1997).

O comportamento mecânico dos aços inoxidáveis duplex está intimamente relacionado com a característica de cada fase, por isso o balanceamento entre as frações volumétricas de austenita e ferrita deve estar próximo de 50% para cada uma das fases, a fim de se maximizar as propriedades mecânicas. (SENATORE; FINZETTO; PEREA, 2007).

A Tabela 2 compara as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis de microestrutura duplex com os aços inoxidáveis austeníticos. (NILSSON, J.- O, 1997).

Tabela 2 - Comparação entre as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis duplex com as ligas austeníticas

AISI/UNS	Resistência ao escoamento [Mpa]	Resistência a tração [Mpa]	Alongamento mínimo [%]	Dureza Vickers	Microestrutura
304L	210	515-680	45	155	Austenita
316L	220	515-690	40	160	Austenita
S 32304	400	600-820	25	230	Duplex
S 31803	450	680-880	25	260	Duplex
S 32750	550	800-1000	25	290	Duplex

Fonte: Nilsson, J.- O, 1997.

Na tabela acima foram apresentadas as principais propriedades mecânicas de algumas ligas de aço inoxidável, e pode-se observar que dentre elas o que apresenta os maiores valores é o S32750, isto ocorre porque estas características estão diretamente relacionadas com a microestrutura do material, ou seja, a porcentagem de austenita e ferrita.

Os aços inoxidáveis duplex apresentam alta resistência ao impacto na temperatura ambiente (25°C). Sua tenacidade está limitada à fração volumétrica e distribuição da ferrita. Com uma fração volumétrica de austenita da ordem de 40%, obtém-se prevenção efetiva do crescimento de trincas. (SOLOMON, H.D, DEVINE, T.M, 1984).

A Tabela 3 apresenta as principais características físicas dos aços inoxidáveis duplex, estabelecendo um comparativo com as dos aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos. (GOMES, E.S.P., VIÑAS, J.B., VATAVUK, J, 1999).

Tabela 3 - Propriedades físicas

Material	UNS	Calor Específico J/Kg°C			Condutibilidade Térmica W/m°C		
		20°C	200°C	400°C	20°C	200°C	400°C
Ferrítico	S 43000	460	540	580	17	22	23
Austenítico	S 30400	480	510	540	14	17	20
	S 32304	490	530	590	16	18	21
Duplex	S 31803	480	530	590	14	17	20
	S 32750	480	530	580	14	17	20

Fonte: Gomes, E.S.P., Viñas, J.B., Vatavuk, J, 1999.

Observando a Tabela 3, nota-se que os aços duplex apresentam comportamento intermediário entre os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos. A condutibilidade térmica dos aços inoxidáveis duplex é maior do que a dos aços inoxidáveis austeníticos. (SENATORE; FINZETTO; PEREA, 2007).

Além destas propriedades físicas e mecânicas, o aço inoxidável duplex também é muito visado por suas propriedades químicas anticorrosivas, que pode ser aplicado em diversos segmentos da indústria, assunto que será abordado posteriormente.

A resistência à corrosão é determinada pela capacidade que os materiais têm de se passivar e permanecer nesse estado no ambiente a que estiver exposto. Essa propriedade está relacionada, principalmente, aos elementos de liga presentes na composição química do aço, embora outros fatores como tamanho de grão, distribuição e morfologia de inclusões, precipitação de fases e qualidade da superfície também exerçam influência. (SENATORE; FINZETTO; PEREA, 2007).

2.1.2 APLICAÇÕES DOS INOXIDÁVEIS DUPLEX NA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA

A indústria petroquímica é uma subdivisão da indústria química, ela é caracterizada por utilizar derivados de petróleo como matérias-primas básicas em seus processos. Ela surgiu na década de 1920, nos Estados Unidos, como resultados de pesquisas que visavam à transformação de produtos naturais. (FORTE, 2011).

Estas indústrias trabalham com diferentes variáveis de temperatura e pressão, além de produtos de diferentes composições químicas favorecendo, assim, a corrosão dos equipamentos e tubulações industriais. Os materiais para equipamentos de processos devem atender com segurança às condições de serviço de uma determinada aplicação, verificando sempre as propriedades dos materiais e o custo-benefício do processo. (TELLES, 2003).

Muitas pesquisas são desenvolvidas com o intuito de se descobrir materiais que resista a ambientes quimicamente hostis, com variações bruscas de temperatura e pressão no caso da extração de petróleo e gás, e mecanicamente resistentes no caso das perfurações dos poços. (FORTE, 2011).

Para que seja possível a compreensão da importância do aço inox superduplex SAF 2507 na indústria petrolífera, antes é preciso entender onde este aço é aplicado, para isto serão abordados alguns conceitos básicos da extração de petróleo.

No Brasil, a extração de petróleo é concentrada em sua grande maioria em plataformas marítimas, porém nem todos os países apresentam essa característica. Na década de 1930, nos EUA, moradores de províncias petrolíferas “batizaram” um destes equipamentos de “árvore de natal”, porque acharam que sua estrutura, coberta de neve, se parecia com um pinheiro. A nomenclatura logo passou a ser utilizada e, nas ocasiões em que os poços ficam embaixo d’água, ganhou o adjetivo “molhada”, criando assim a Árvore de Natal Molhada, conhecida como ANM.

A ANM é um equipamento fundamental para a segurança da extração do petróleo, forjado em uma liga metálica especial, com diversas válvulas manuais e hidráulicas, com a função de controlar principalmente a pressão dos líquidos na saída do poço.

Este equipamento é instalado em águas profundas, e faz a ligação entre o sistema submarino de produção e o poço de petróleo. Por meio da ANM, o operador

do poço pode abrir e fechar válvulas, respondendo a mudanças de pressão, vazão e temperatura, garantindo a movimentação segura do óleo. Caso aconteça algum vazamento, a ANM é a primeira linha de defesa, onde as válvulas presentes na estrutura se fecham, e suportam a pressão, até certo ponto. A Figura 1 ilustra uma ANM.

Figura 1 - Árvore de Natal Molhada (ANM).



Fonte: Petróleo Hoje, 2021.

A ANM mais utilizada na extração de petróleo no Brasil e no mundo é chamada de convencional ou vertical. Ela é encaixada na cabeça do poço e conectada a uma Base Adaptadora de Produção, conhecida como BAP um conjunto que suporta as linhas de controle e de fluxo, diretamente conectada ao poço.

Também existe a ANM horizontal que opera de forma similar, mas tem como principal característica a eliminação da necessidade de uma BAP, pois a própria ANM atua como base e suas válvulas são montadas na lateral.

2.2 UNIÃO DE LINHAS HIDRÁULICAS

Além dos componentes já mencionados presentes na ANM, existem também as linhas hidráulicas, que, como visto anteriormente, são as responsáveis por fazer a atuação das válvulas, atuadores, cilindros e filtros presentes na estrutura. Estas linhas hidráulicas são, mais precisamente, tubulações de diâmetros específicos fabricadas em aço inox duplex.

Estes tubos são os responsáveis por fazer a interligação dos componentes da ANM, porém muitas vezes a distância entre um componente e outro é muito grande e o tubo fica restrito a um comprimento de 6 metros, além das interferências causadas pela geometria do equipamento e das limitações dos instrumentos e máquinas utilizados para fazer a conformação dos tubos.

Isto traz a necessidade da união destes tubos para que seja possível chegar em todos os pontos do equipamento, esta união é feita tanto por conexões hidráulicas, quanto por soldagem. Na Figura 2 é possível ver exemplos de conexões hidráulicas.

Figura 2 - Conexões Hidráulicas.



Fonte: Catálogo Swagelok Tecflux, 2022.

Além destas conexões também é utilizada a soldagem como forma de união das tubulações, este é um processo feito com a soldagem TIG orbital automatizada, conhecida como solda orbital.

2.2.1 SOLDAGEM TIG ORBITAL AUTOMATIZADA

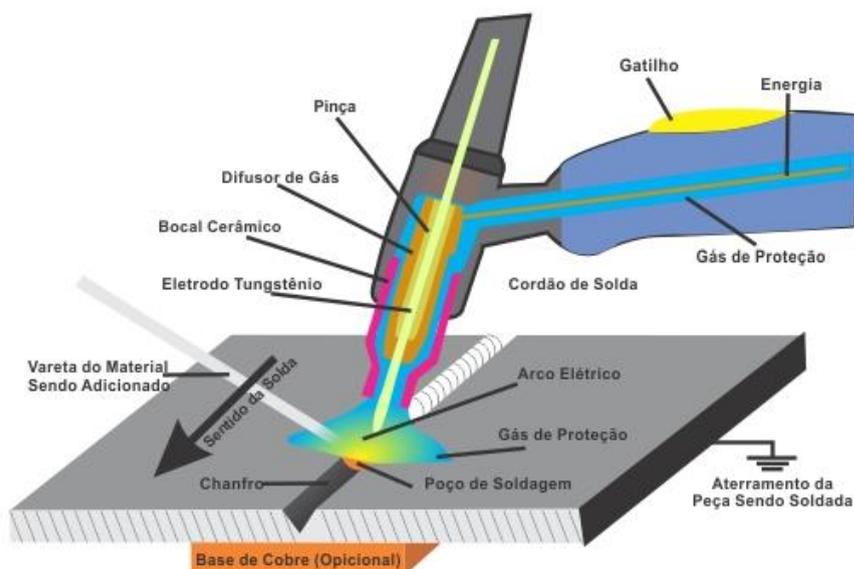
Antes de iniciar a explicação quanto a solda orbital, é necessário entender o processo de solda TIG que é o processo aplicado nesta pesquisa, porém com a diferença de ser automatizado.

O processo de soldagem TIG, do inglês Tungsten Inert Gas, também conhecido como Gas Tungsten Arc Weld (GTAW) foi desenvolvido no início dos anos 1940 para atender a exigente demanda da indústria aeroespacial, em pleno avanço e desenvolvimento na época, precisando, portanto, ser um processo de alta confiabilidade.

No processo de soldagem TIG um arco elétrico é formado entre um eletrodo de tungstênio não consumível (alojado na tocha) e o metal de base, atravessando um gás ionizado que tem como função proteger a solda e evitar discontinuidades na

mesma. O calor gerado neste processo funde o metal base gerando a chamada poça de fusão. Com a movimentação da tocha o arco funde progressivamente a superfície da junta, onde pode-se ou não usar a adição de metal. A Figura 3 mostra o princípio de funcionamento do processo de soldagem TIG.

Figura 3 - Funcionamento da soldagem TIG.



Fonte: Blog Barragas Gases E Ferramentas, 2016.

Diferente do processo de soldagem TIG convencional, o processo de solda orbital não possui a opção de utilizar metal de adição, ou seja, é um processo autógeno, onde o próprio metal base fundido é que faz a união dos componentes.

O processo de solda orbital é exclusivo para tubulações de diâmetros específicos, no caso da instrumentação são diâmetros de 3/8", 1/2", 3/4" e 1". Desta maneira é possível utilizar blocos de fixação que são fabricados com os diâmetros mencionados, que fixam os dois componentes a serem unidos para não haver folga entre eles. A Figura 4 ilustra os blocos de fixação.

Figura 4 - Bloco de Fixação.



Fonte: Catálogo Swagelok Tecflux, 2022.

Para a realização da solda é utilizado um cabeçote que faz a função da tocha, porém neste caso o processo é totalmente automatizado, não havendo a necessidade de solda manual. A Figura 5 mostra o cabeçote de soldagem.

Figura 5 - Cabeçote para soldar.



Fonte: Catálogo Swagelok Tecflux, 2022.

A solda é realizada com o tubo posicionado no bloco de fixação e o cabeçote faz o encaixe envolvendo o tubo e fixando-o no bloco para que não haja movimentações enquanto a solda estiver sendo realizada. A Figura 6 mostra a fixação entre o cabeçote e o bloco.

Figura 6 - Fixação do cabeçote no bloco.



Fonte: Catálogo Swagelok Tecflux, 2022.

Esta fixação também permite manter uma atmosfera apenas com o gás de proteção, chamado de purga, que se mantém enquanto estiver sendo realizada a solda, para expulsar o gás oxigênio e evitar defeitos na solda.

Além destes componentes principais, existe um último que é utilizado apenas quando o tubo a ser soldado for de aço inoxidável superduplex, que é o caso para a presente pesquisa, o fluxo de soldagem.

Segundo a fabricante Swagelok, o fluxo de soldagem serve como um agente reativo com o arco, permitindo a redução da largura do cordão e aumento da penetração em até 300%. Ao usar o fluxo, é possível reduzir a quantidade de calor necessária para a penetração total e manter o equilíbrio de fase crítica do metal base.

Este fluxo é um pó utilizado para aumentar a temperatura da poça de fusão, pois os aços inoxidáveis superduplex são fundidos em uma temperatura mais elevada, e este fluxo faz com que a amperagem fornecida pela fonte possa ser menor, porém obtendo o mesmo resultado. A Figura 7 mostra o fluxo para solda.

Figura 7 - Fluxo para solda.

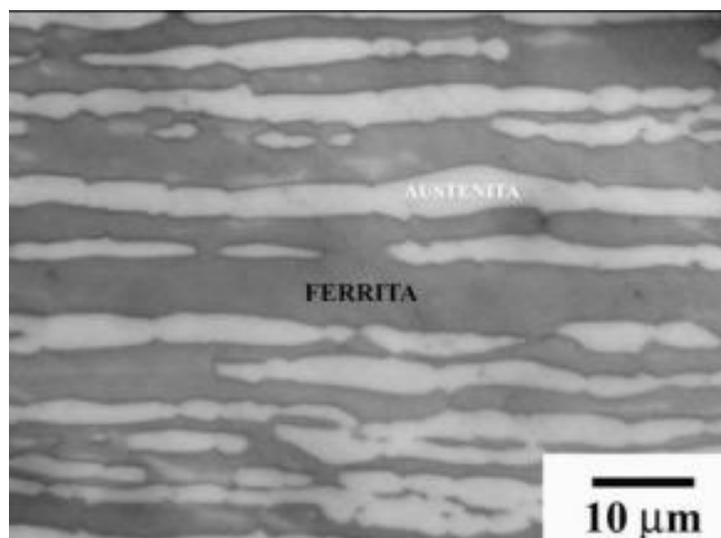


Fonte: Catálogo Swagelok Tecflux, 2022.

2.3 IMPORTÂNCIA DA FERRITA E AUSTENITA NA MICROESTRUTURA

No processo de soldagem orbital é de extrema importância controlar a porcentagem de ferrita que é formada na microestrutura do material, pois este é um fator crítico que irá influenciar na corrosão do aço inoxidável superduplex. A Figura 8 ilustra uma microestrutura ferrítica do aço inoxidável superduplex UNS S32750, na direção de laminação.

Figura 8 - Microestrutura Ferrítica.



Fonte: Prof. Afonso Vicente Ventrella, s.d.

Com base na análise desta imagem é possível observar que a microestrutura é formada por frações volumétricas de 50% de ferrita e 50% de austenita, conforme Senatore; Finzetto; Perea (2007).

A ferrita em aços superduplex é uma rede cristalina que contém ferro como principal componente, e é formada pela adição de cromo, molibdênio e outros elementos à mistura, visando aumentar sua resistência à corrosão e à oxidação em altas temperaturas.

A ferrita oferece uma excelente resistência à corrosão devido à formação de um filme passivante de óxidos estáveis, sendo que a liga UNS S32750 é utilizada principalmente em condições severas, onde tal resistência é de extrema importância. Essas ligas substituem os aços austeníticos, por diversos motivos, tais como por possuírem resistência à corrosão comparável ou até mesmo superior em diversas condições, além de apresentarem uma maior resistência mecânica, tenacidade comparável, não se excluindo o fato de possuírem resistência à corrosão sob tensão. (GARCIA, 2012).

Enquanto a austenita é uma fase cristalina do ferro que é estável à temperatura ambiente em ligas que contêm elementos estabilizadores, como o níquel, cromo e manganês. É uma fase importante na metalurgia do ferro e suas ligas, sendo responsável pelas propriedades mecânicas e físicas desses materiais. A austenita é conhecida por sua alta ductilidade, resistência à corrosão e facilidade de deformação. Além disso, é a fase responsável pelo efeito de têmpera em aços, no qual o resfriamento rápido do material a partir da temperatura de austenitização resulta em uma microestrutura hardenizada.

Em aços superduplex, a quantidade de ferrita pode variar de acordo com a composição química, podendo ser controlada para atender aos requisitos de desempenho específicos. Para isto serão realizados ensaios metalográficos para verificar a formação da ferrita e medições da porcentagem de ferrita na superfície da solda.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Na presente pesquisa foi utilizado o aço UNS S32750 como metal base, sendo três amostras de tubos de 3/4" de diâmetro e 100mm de comprimento.

Foi utilizado o Fluxo de Solda SWS-FLUX-1 da fabricante Swagelok, no entanto a composição química deste produto é classificada como segredo industrial por este motivo não é possível especificar os elementos que o compõe.

Para a realização da soldagem foi utilizado a Máquina de Soldagem Orbital Swagelok M200.

Para realizar a proteção durante a soldagem foram utilizados os gases nitrogênio e argônio.

Para a realização do ataque eletrolítico foram utilizados uma fonte estabilizadora CTRL TECH modelo CCY1000-20DA1A, uma haste cilíndrica de 1/4" de diâmetro de aço inoxidável 316L e solução líquida de NaOH diluída em água.

3.2 MÉTODOS

Para iniciar o processo, primeiramente o tubo foi cortado com 100mm de comprimento com o auxílio da serra de fita horizontal, para obter-se um corte reto, o que será de extrema importância para a soldagem. A Figura 9 ilustra a serra utilizada.

Figura 9 - Serra de Fita Starrett.



Fonte: Catálogo Starrett, 2023.

Após realizado o corte das amostras na medida desejada, é necessário facear os tubos pois ficam com algumas irregularidades provenientes do corte, o que causariam interferência na soldagem. Para isto foi utilizada a faceadora Swagelok com matriz de 3/4", como ilustra a Figura 10.

Figura 10 - Faceadora Swagelok.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Após realizado o faceamento dos tubos, os mesmos devem ser preparados para a soldagem e retiradas possíveis rebarbas, para isto foi utilizada uma mini retífica com uma pedra abrasiva e uma lixa, como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Mini Retífica Dremel.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

As retíficas devem ser utilizadas da seguinte maneira: a pedra abrasiva na parte interna do tubo para retirar as rebarbas e a lixa na parte externa para polir a superfície onde será realizada a solda. A Figura 12 e 13 ilustram este processo.

Figura 12 - Limpeza interna do tubo.



Fonte: Aatoria Própria, 2023.

Figura 13 - Limpeza externa do tubo.



Fonte: Aatoria Própria, 2023.

Com as amostras prontas foi feita a seleção do programa de soldagem de acordo com o material e diâmetro do tubo pois isto influencia nos parâmetros de soldagem, a fonte utilizada foi a Máquina de Soldagem Orbital Swagelok M200,

como ilustra na Figura 14.

Figura 14 - Máquina de Soldagem Orbital Swagelok M200.



Fonte: Catálogo Swagelok Tecflux, 2022.

Após selecionado o programa de soldagem foi feita a regulagem do fluxo de gás de purga, que neste caso é o nitrogênio, para isto é necessário utilizar um manômetro para garantir que a vazão esteja dentro do especificado de 2,0 IWC (polegada por coluna d'água). Neste passo é importante conectar as duas amostras que serão soldadas a fim de se obter o comprimento total do tubo, pois a pressão interna é alterada conforme a área a ser protegida pelo gás.

Além disso, foi conectada uma restrição em uma das pontas do tubo, para impedir a saída do gás e manter a atmosfera de proteção, esta restrição tem apenas um pequeno furo para manter a circulação do gás. A Figura 15 ilustra o processo de regulagem do gás.

Figura 15 - Regulagem do Gás de Purga.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Após a regulagem correta do gás, o tubo foi posicionado no bloco de fixação e foi utilizado um gabarito para garantir que a face do tubo ficasse exatamente no centro e assim a solda ficará na posição correta. A Figura 16 ilustra o posicionamento do tubo.

Figura 16 - Posicionamento no Bloco de Fixação.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Com o tubo devidamente posicionado, o próximo passo foi fixar a outra

amostra mantendo suas faces paralelas para garantir que a solda ficará exatamente na união dos tubos. A Figura 17 mostra o posicionamento correto.

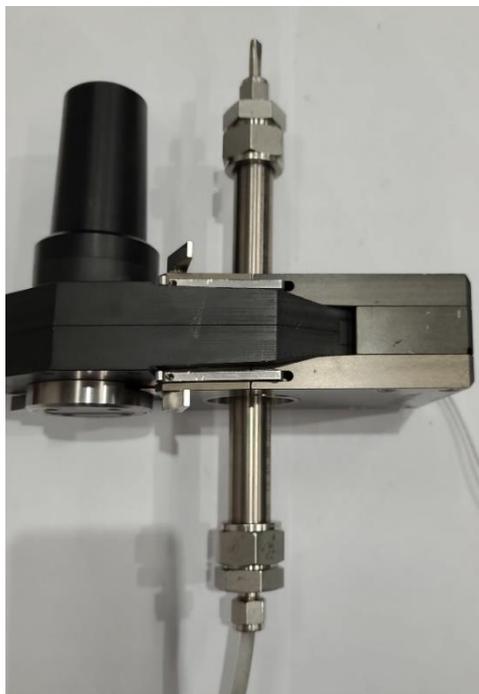
Figura 17 - Posicionamento das amostras no Bloco.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

O último passo antes de realizar a solda foi acoplar o cabeçote no bloco, como mostra a Figura 18.

Figura 18 - Acoplamento do Cabeçote no Bloco de Fixação.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Neste momento as amostras podem ser soldadas com o primeiro programa da máquina, que é o de ponteamento, onde foram realizados três pontos para unir os dois tubos. A Figura 19 mostra o programa e a posição dos pontos, onde também evidencia a corrente utilizada no ponteamento, que foi de 55A.

Figura 19 - Programa de Ponteamento.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Antes de seguir para o primeiro passe de solda foi preciso verificar se os pontos ficaram na posição correta, pois é importante manter o alinhamento em relação à linha de união dos tubos para que o passe final fique no local correto, porém, caso seja necessário, pode-se reajustar a posição do bloco para alinhar o centro. A Figura 20 ilustra a amostra ponteada conforme o primeiro programa.

Figura 20 - Amostra Ponteada.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Após realizado o ponteamto seguiu-se para o primeiro passe de soldagem, chamado de selagem. Para isto foi utilizado o mesmo programa da máquina, porém desta vez foi feita a soldagem por completo em todo o perímetro do tubo.

A Figura 21 ilustra os parâmetros do programa de selagem, onde pode-se observar que a corrente varia de 10A a 50A. O tempo aproximado deste passe é em torno de 30 segundos, porém pode variar conforme o diâmetro do tubo.

Figura 21 - Passe de Selagem.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

A Figura 22 ilustra a amostrada soldada com o passe de selagem.

Figura 22 - Amostra Passe de Selagem.



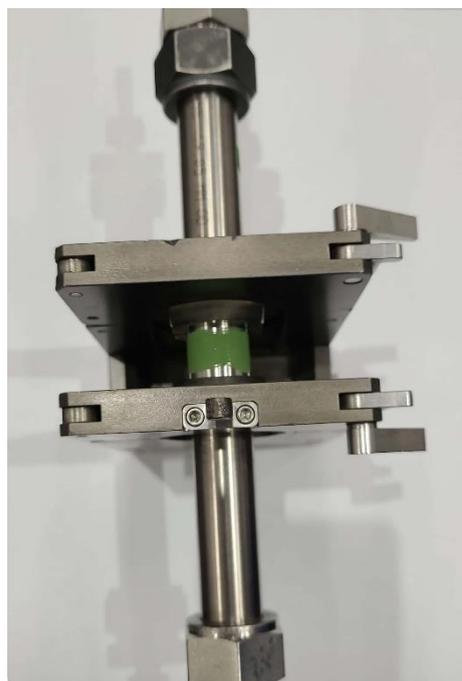
Fonte: Autoria Própria, 2023.

Posteriormente, antes do segundo e último passe é preciso aplicar o fluxo sobre a selagem, este produto tem a função de aumentar a temperatura da poça

de fusão, por se tratar de um reagente ativo, para obter a penetração desejada sem a necessidade de aumentar os parâmetros de soldagem. Porém, é importante destacar que o fluxo é aplicado somente após o passe de selagem pois se fosse aplicado logo após o ponteamto haveria uma penetração excessiva podendo comprometer o diâmetro interno do tubo.

A aplicação do fluxo deve ser extremamente precisa, sendo uma camada fina a ser depositada somente sobre o local da solda. A Figura 23 ilustra a aplicação do fluxo de soldagem.

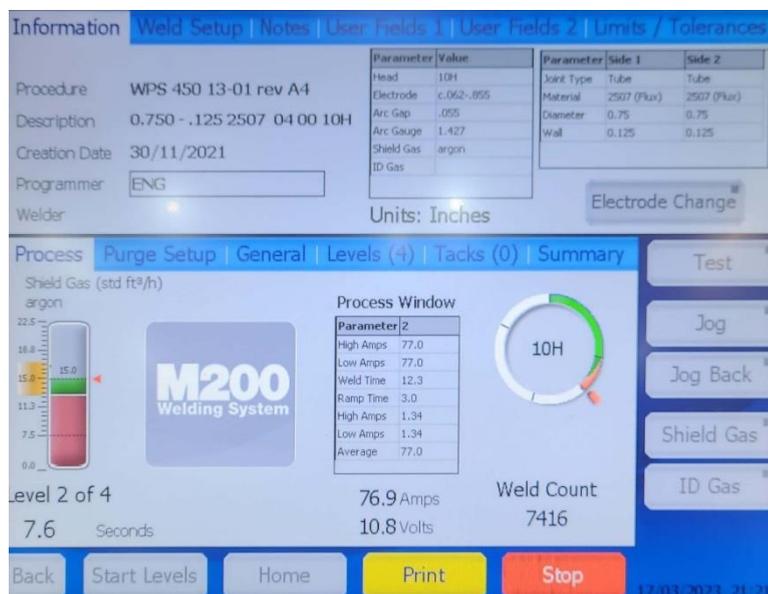
Figura 23 - Aplicação do Fluxo.



Fonte: Aatoria Própria, 2023.

Após a aplicação do fluxo foi acoplado novamente o cabeçote no bloco para ser realizado o último passe. Porém o programa foi diferente desta vez, pois se trata do passe final. A Figura 24 ilustra os parâmetros do programa, onde observa-se que a corrente é de 77A.

Figura 24 - Passe Final.



Fonte: Aatoria Própria, 2023.

A Figura 25 ilustra a amostrada soldada com o passe final.

Figura 25 – Amostra Passe Final.



Fonte: Aatoria Própria, 2023.

Seguindo o processo foram soldados mais dois corpos de prova, ambos seguindo o mesmo processo descrito anteriormente, porém sem a utilização do

fluxo de soldagem. O intuito é substituir o fluxo pelo aumento da amperagem e verificar se é possível obter a mesma penetração em ambos os casos.

As amostras sem o fluxo foram soldadas da seguinte maneira: a primeira não teve alteração dos parâmetros de soldagem e a segunda foi alterada a corrente para 100A. As correntes utilizadas para o passe final em cada amostra podem ser observadas na Tabela 04, onde, todos estes parâmetros utilizados desde o ponteamto até o passe final para as amostras CP1 e CP2 foram utilizados conforme a EPS pré estabelecida e devidamente qualificada. Também é importante destacar que os parâmetros de ponteamto e selagem não foram alterados, apenas o passe final teve sua corrente aumentada.

Tabela 4 - Correntes Utilizadas.

Amostra	Corrente Mínima [A]	Corrente Máxima [A]
1	77	77
2	77	77
3	95	100

Fonte: Autoria Própria, 2023.

Não foram realizados mais corpos de prova com amperagem mais alta, pois já foi possível observar descontinuidades na solda com a corrente de 100A, ocorreu uma diminuição na espessura do tubo devido ao aumento excessivo da corrente.

Após realizadas todas as soldagens é necessário fazer a limpeza do cordão de solda, pois como pôde se observar anteriormente na Figura 25, o cordão fica com resíduos do fluxo de solda e precisa ser limpo. Para isso utilizou-se as mesmas retíficas que foram usadas para preparação das amostras, juntamente com uma manta abrasiva. A Figura 26 ilustra o cordão após ser limpo.

Figura 26 - Amostra após limpeza.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Com as amostras soldadas e polidas foi realizada a medição da porcentagem de ferrita na superfície soldada, esta análise é de extrema importância pois a concentração de ferrita no material influencia na oxidação do mesmo. A Figura 27 ilustra o equipamento utilizado para fazer a medição, chamado de ferritoscópio, onde o controle é feito de forma não destrutiva para avaliar se a porcentagem de ferrita está dentro de 30% a 60%, se estiver fora deste valor deverá ser feita uma análise destrutiva.

Figura 27 - Ferritoscópio Fischer.

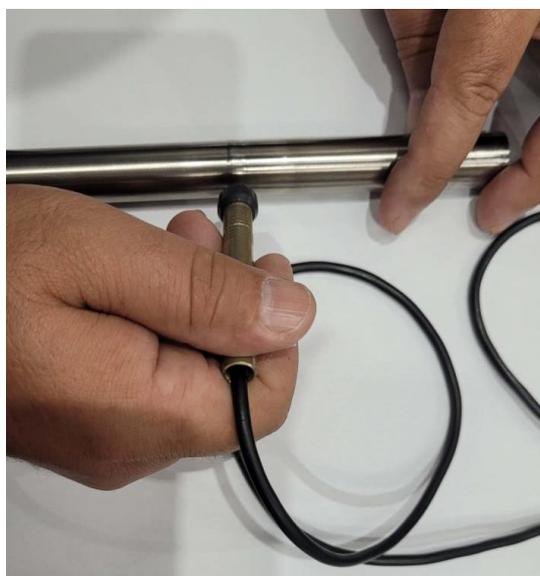


Fonte: Autoria Própria, 2023.

Para realizar a análise da ferrita foi necessário, primeiramente, calibrar o ferritoscópio com a faixa de porcentagem desejada em um bloco padrão que acompanha o equipamento, que neste caso foi o de 42,3 Fe%.

Após calibrado, foram feitas as medições na superfície da solda de todas as amostras, sendo que, foram feitas três medições em cada quadrante da solda, para garantir a homogeneidade dos resultados. A Figura 28 ilustra o processo de medição.

Figura 28 - Medição da Porcentagem de Ferrita.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

A Tabela 5 ilustra os resultados obtidos das medições de porcentagem.

Tabela 5 - Medição da Concentração de Ferrita.

Concentração de Ferrita [%]		
CP 01	CP 02	CP 03
47,8	71,2	65,4
46,6	64,6	64,7
45,0	64,6	65,8
48,2	72,0	67,0
47,4	65,7	73,6
49,9	62,8	66,7
46,7	65,6	72,0
47,4	69,0	67,5
48,2	70,9	73,3
48,3	66,8	67,2
47,2	68,5	71,1
47,1	68,9	65,9

Fonte: Autoria Própria, 2023.

A média desses resultados foi de 47,4% para o CP 01, 67,6% para o CP 02 e 68,4% para o CP 03.

Após serem feitas as medições da porcentagem de ferrita foi necessário realizar um corte paralelo a solda a fim de reduzir suas dimensões para o seu posterior embutimento. Para isto foi utilizada a mesma serra de fita Starrett citada anteriormente. Em seguida, foi realizado um segundo corte perpendicular ao cordão de solda, porém desta vez foi utilizado um arco de serra manual. Pode-se observar as amostras cortadas na Figura 29.

Figura 29 - Amostras Cortadas.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Após cortadas, as amostras foram embutidas com as duas faces soldadas posicionadas para cima, utilizando uma baquelite de 35mm de diâmetro. A Figura 30 ilustra a embutidora Arotec que foi utilizada e a Figura 31 ilustra as amostras embutidas.

Figura 30 - Embutidora Arotec.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Figura 31 - Amostras Embutidas.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Após embutidas, as amostras foram lixadas com uma lixa de granulometria mais alta para retirar as marcas provenientes do corte com mais facilidade. Para isto foi utilizada a lixa de fita Baldan LFH – 2, como ilustra na Figura 32.

Figura 32 - Lixa de Fita Baldan LFH – 2.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Após a remoção das marcas mais profundas, as amostras foram lixadas em uma sequência de granulação menor, sendo que, em cada lixamento a amostra foi girada a 90°, e a cada nova lixa os sulcos foram deixados sempre em um único sentido. A Figura 33 ilustra a lixadeira utilizada.

Figura 33 - Lixadeira Circular Arotec.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Nesta segunda etapa de lixamento a superfície da amostra foi lixada até a lixa de 2000 (que se refere ao número de grãos de areia por centímetro quadrado). Após realizado o lixamento, seguiu-se para o polimento que foi realizado com uma politriz circular montada com um pano de polimento de

alumina $0,3 \mu$ e umedecido com água destilada até obter uma superfície espelhada. A Figura 34 ilustra a politriz utilizada.

Figura 34 - Politriz Circular Arotec.



Fonte: A autoria Própria, 2023.

3.2.1 ATAQUE ELETROLÍTICO

Para analisar a penetração da solda e sua microestrutura foi realizado um ataque eletrolítico com uma solução de NaOH com concentração de 20% diluída em água.

Para a execução dessa etapa foi de extrema importância controlar as variáveis de corrente e tensão, com o auxílio da fonte estabilizadora CTRL TECH ilustrada na Figura 35. Foi necessário também controlar a temperatura, o PH, tempo de exposição e manter a solução sempre homogênea com o auxílio de um agitador. Na Tabela 06 pode-se observar todos os parâmetros mensurados durante o ensaio.

Figura 35 - Fonte CTRL TECH.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Tabela 6 – Parâmetros do Ensaio.

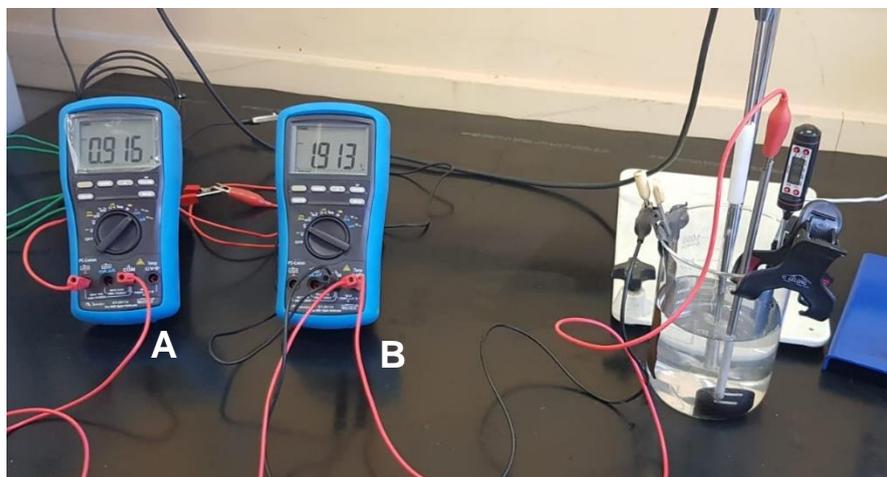
Parâmetros	CP 01	CP 02	CP 03
Tensão [V]	1,9	1,9	1,9
Corrente [A]	0,9	0,9	0,89
Temperatura Inicial [°C]	16,3	16,5	16,6
Temperatura Final [°C]	16,4	16,6	16,7
PH	12	12	12
Tempo [s]	60	60	60

Fonte: Autoria Própria, 2023.

O ataque foi realizado individualmente em todas as amostras, onde a amostra foi inserida em um béquer com 500ml de solução, foi posicionado na amostra um eletrodo negativo de aço inoxidável 316L e um eletrodo positivo de liga de Níquel, que confere excelente condutibilidade, posicionado na borda do béquer em contato com a solução. Foi necessário utilizar um agitador imerso na solução para garantir a homogeneidade da mistura.

Para energizar e monitorar os parâmetros foram utilizados dois multímetros, um deles (A) configurado em série para monitorar a corrente e o outro (B) em paralelo para monitorar a tensão que foram conectados um em cada eletrodo, foi utilizado também um termômetro imerso na solução para realizar o controle da temperatura do sistema. O sistema completo está ilustrado na Figura 36.

Figura 36 - Ataque Eletrolítico.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Para realizar o ataque foi aplicada uma tensão de 1,9V com o tempo de exposição de 60s, após o tempo descrito a amostra foi retirada da solução e lavada com álcool etílico 99,5%, seca com jatos de ar quente e encaminhada ao processo de análise metalográfica no estereoscópio, como ilustra a Figura 37 e no microscópio como ilustra a Figura 38.

Figura 37 - Estereoscópio Olympus.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Figura 38 - Microscópio Óptico.



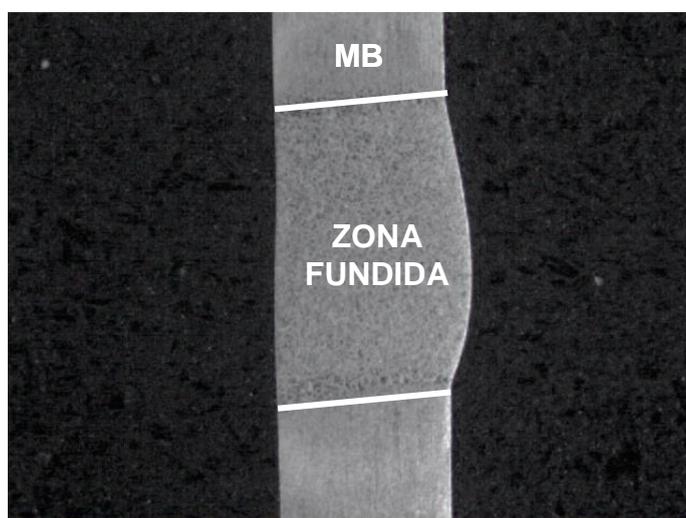
Fonte: Aatoria Própria, 2023.

No estereoscópio, as imagens obtidas foram ampliadas em 6,7x para identificar a penetração de cada amostra, e no microscópio foram ampliadas para identificar as microestruturas formadas em cada condição de soldagem, para então poder comprovar a importância do fluxo de solda na penetração do metal base.

4 RESULTADOS

O estudo dos resultados se iniciou analisando as macrografias das amostras para identificar a zona fundida formada em cada parâmetro de soldagem. Na Figura 39 observa-se a macro do CP 01 com ampliação de 6,7X.

Figura 39 - CP 01 Macro 6,7X.

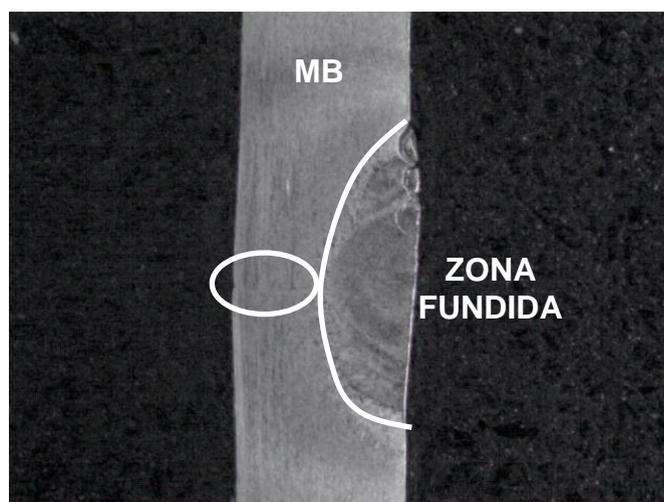


Fonte: Autoria Própria, 2023.

Na Figura 39 observa-se que o CP 01 foi soldado com os parâmetros adequados e foi utilizado o fluxo de solda. Portanto, a zona fundida ficou concentrada na região central com penetração completa.

Na Figura 40 observa-se a macro do CP 02 com ampliação de 6,7X.

Figura 40 - CP 02 Macro 6,7X.

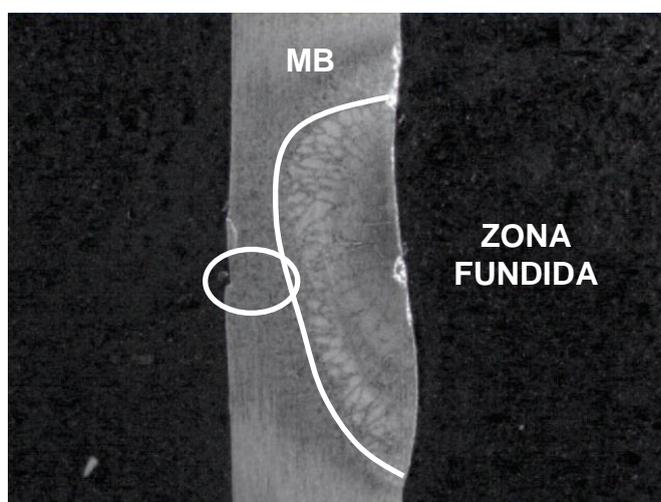


Fonte: Autoria Própria, 2023.

Na Figura 40 observa-se que o CP 02 foi soldado com os parâmetros adequados, porém sem a utilização do fluxo de solda. Portanto, a zona fundida ficou concentrada na região central, porém sem penetrar toda a espessura do tubo, podendo observar também logo abaixo uma linha que evidencia a falta de penetração da solda.

Na Figura 41 observa-se a macro do CP 03 com ampliação de 6,7X.

Figura 41 - CP 03 Macro 6,7X.

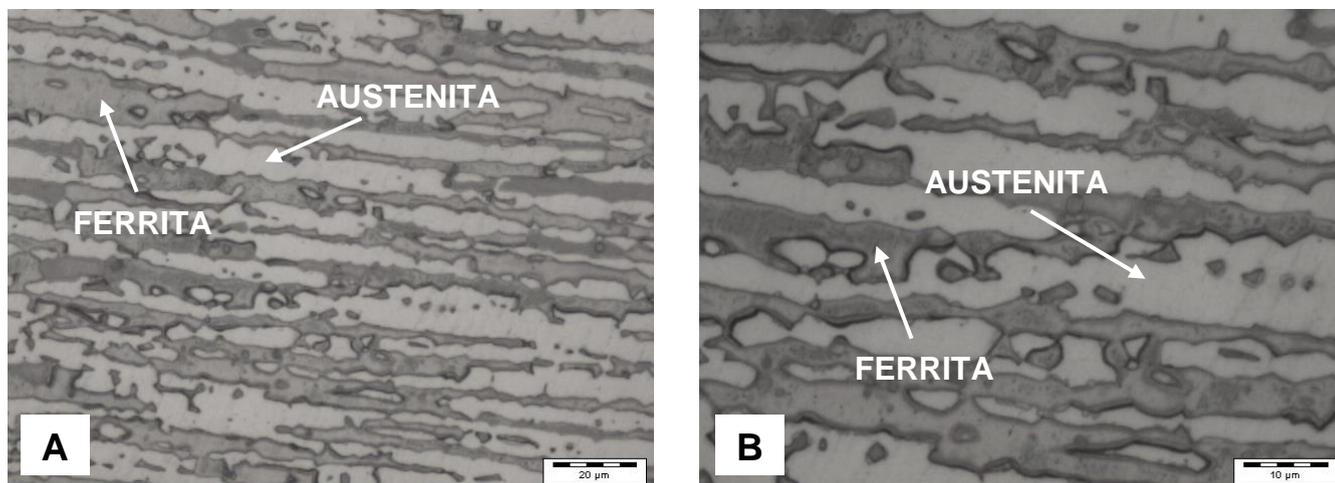


Fonte: Autoria Própria, 2023.

Na Figura 41 observa-se que o CP 03 foi soldado aumentando a corrente para 100 A, conforme a Tabela 04 apresentada anteriormente, neste caso também não foi utilizado o fluxo de solda. Portanto, a zona fundida ficou concentrada na região central, porém sem penetrar toda a espessura do tubo, podendo observar também logo abaixo uma linha que evidencia a falta de penetração da solda.

Seguindo para uma análise mais detalhada das amostras foram realizadas imagens da microestrutura de cada corpo de prova, iniciando com a Figura 42 observa-se o metal base com uma ampliação de 500X e 1000X.

Figura 42 - Metal Base: A)500X B)1000X.

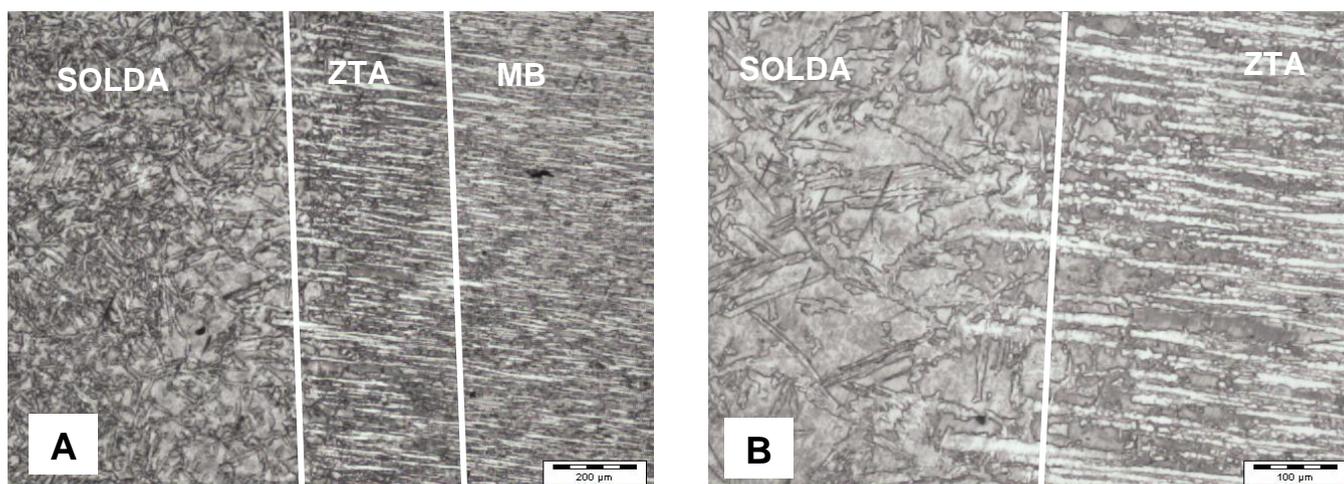


Fonte: Aatoria Própria, 2023.

Na Figura 42 está a microestrutura do metal base onde observa-se uma fração volumétrica de 50% de ferrita (estrutura mais escura) e 50% de austenita (estrutura clara).

É importante também analisar a diferença das microestruturas conforme avança da zona fundida passando pela ZTA e pelo metal base, esta diferença é observada nitidamente na Figura 43.

Figura 43 - CP 01 ZTA: A)50X B)100X.

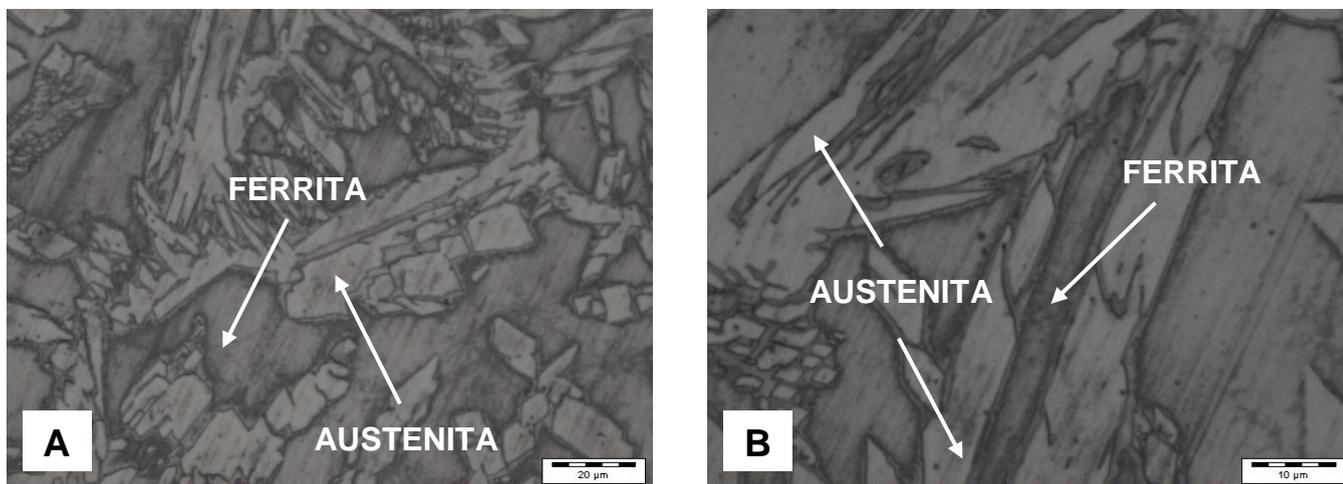


Fonte: Aatoria Própria, 2023.

Na Figura 43 observa-se que no CP 01 a zona fundida, a ZTA e o metal base ficaram bem definidos. Na zona fundida a microestrutura se apresenta com uma granulação dentrítica.

Na Figura 44 observa-se a zona fundida do CP 01 com uma ampliação de 500X e 1000X.

Figura 44 - CP 01 Solda A)500X B)1000X

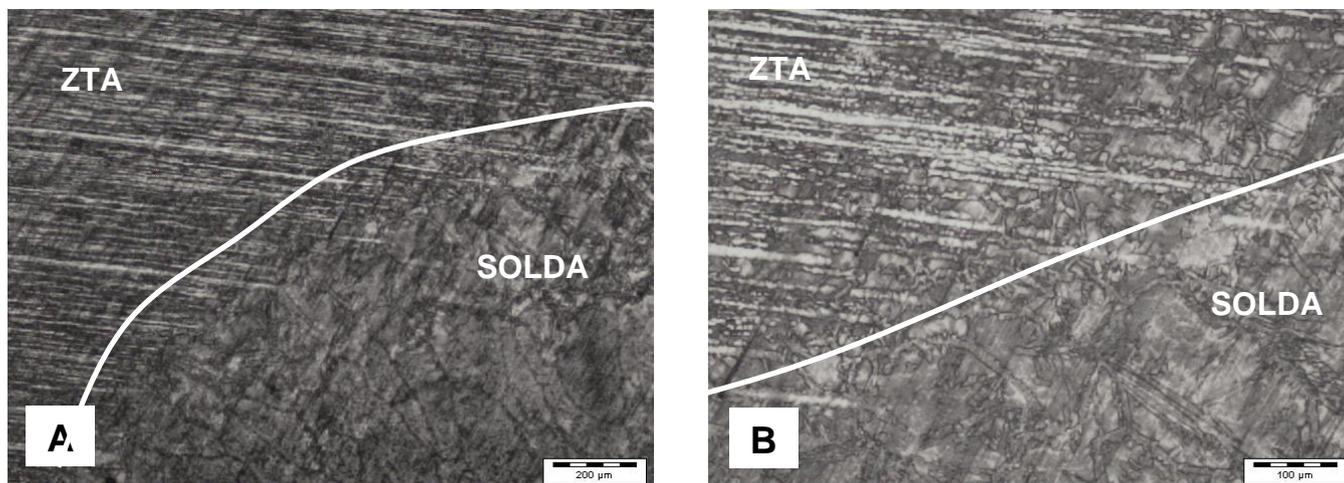


Fonte: Autoria Própria, 2023.

Na Figura 44 observa-se que no CP 01 as microestruturas ferríticas e austeníticas ficaram homogêneas assim como no metal base, porém neste caso a austenita se apresenta no formato de bastonetes alotriomórficos.

Na Figura 45 observa-se a ZTA e a zona fundida do CP 02 com uma ampliação de 50X e 100X.

Figura 45 - CP 02 ZTA A)50X B)100X.

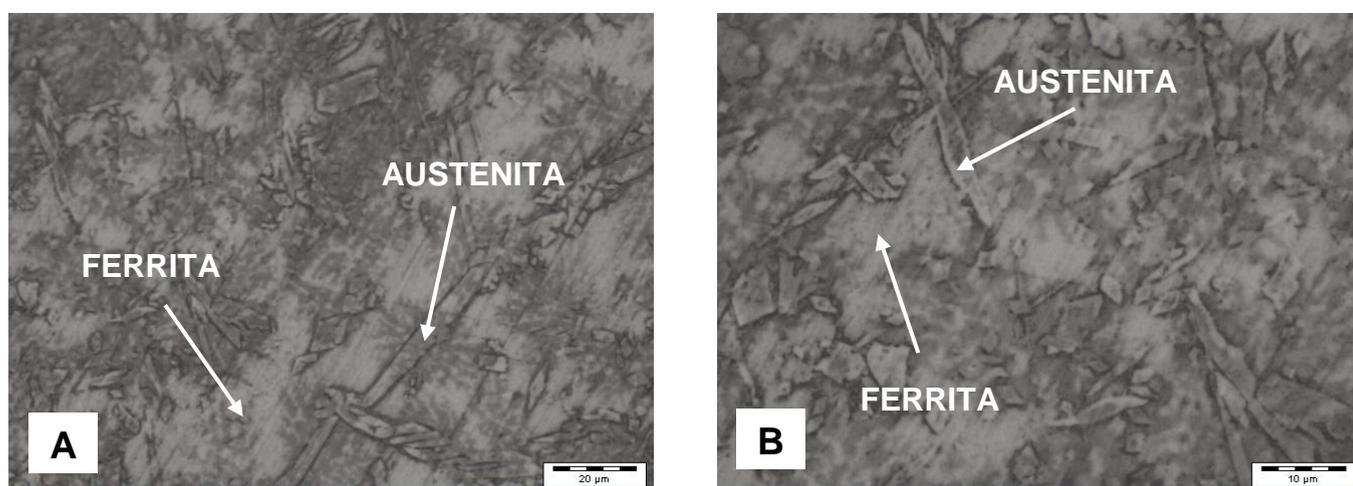


Fonte: Autoria Própria, 2023.

Na Figura 45 observa-se que no CP 02 a zona fundida e a ZTA ficaram em formato de raio pois a penetração não foi total, formando apenas uma pequena zona fundida, onde é possível verificar uma granulação grosseira, pois não houve uma fusão por completo e os locais onde ocorreu a fusão, obteve-se uma temperatura mais elevada, podendo ocasionar uma diminuição da resistência mecânica.

Na Figura 46 observa-se a zona fundida do CP 02 com uma ampliação de 500X e 1000X.

Figura 46 - CP 02 Solda A)500X B)1000X.

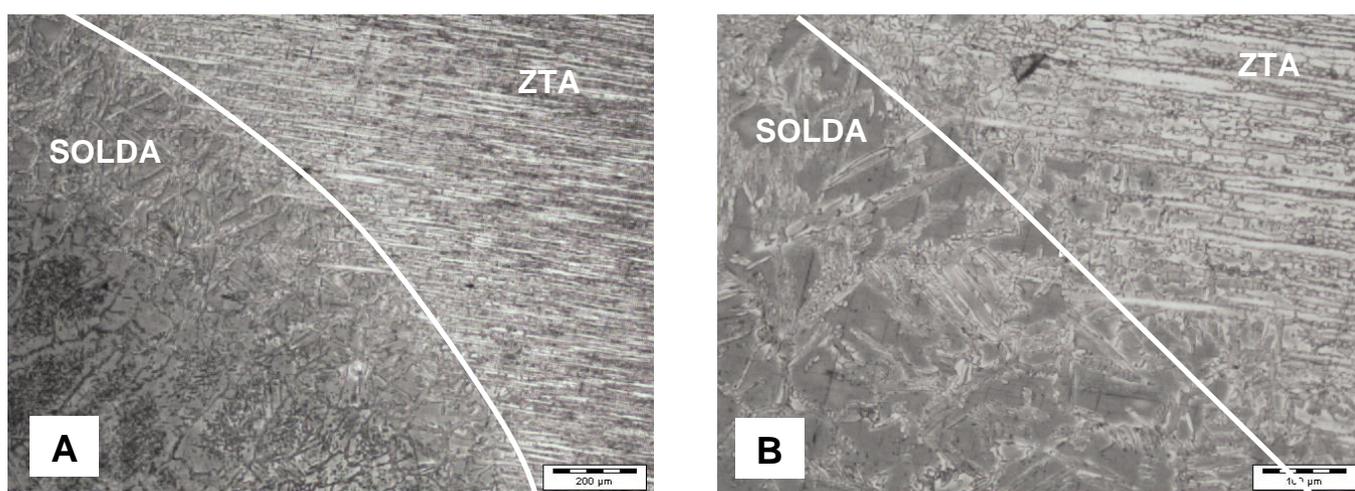


Fonte: Autoria Própria, 2023.

Na Figura 46 observa-se que no CP 02 as microestruturas ferríticas e austeníticas ficaram menos homogêneas e assim como no CP 01 a austenita se apresenta no formato de bastonetes alotriomórficos. Neste caso, ainda é possível se observar uma quantidade razoavelmente proporcional de austenita e ferrita, porém não conforme o especificado, isto ocorre por conta da taxa de diluição mais alta na superfície.

Na Figura 47 observa-se a ZTA e a zona fundida do CP 03 com uma ampliação de 50X e 100X.

Figura 47 - CP 03 ZTA A)50X B)100X.

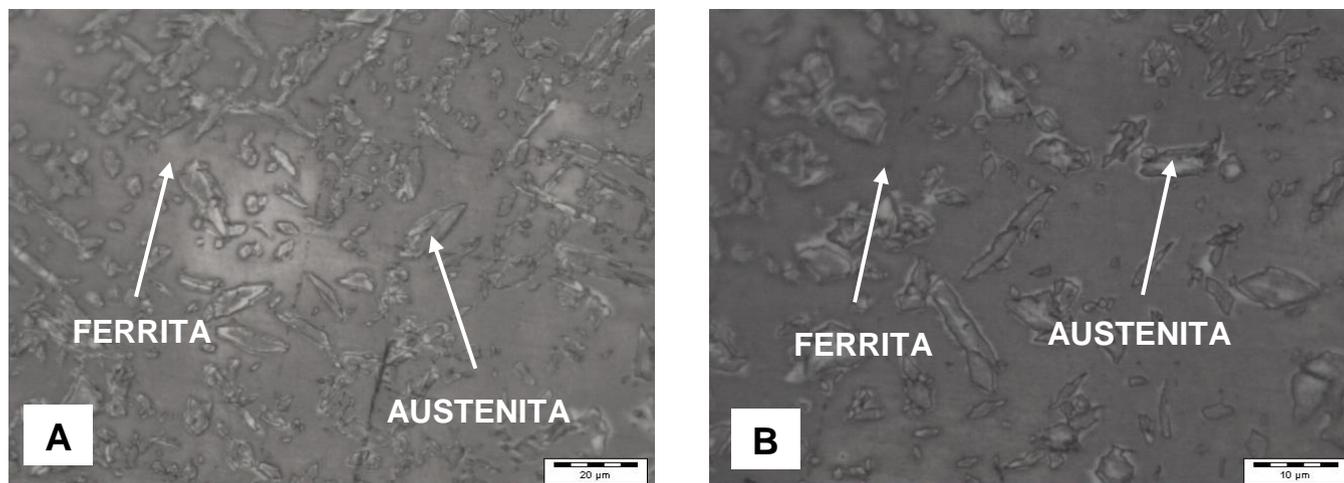


Fonte: Autoria Própria, 2023.

Na Figura 47 observa-se que no CP 03, assim como no CP 02 a zona fundida e a ZTA também ficaram em formato de raio pois a penetração não foi total.

Na Figura 48 observa-se a zona fundida do CP 03 com uma ampliação de 500X e 1000X.

Figura 48 - CP 03 Solda A)500X B)1000X.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Na Figura 48 observa-se que no CP 03 as microestruturas austeníticas estão em forma de ilhas cercadas por uma matriz ferrítica, isto ocorre pois o aumento da corrente elevou excessivamente a temperatura. Portanto, este aumento de temperatura está diretamente relacionado á formação da ferrita.

5 CONCLUSÃO

Com base nas análises realizadas pode-se concluir que o CP 01, que foi soldado dentro dos parâmetros corretos e com a utilização do fluxo de solda, obteve uma penetração total sem indicações de descontinuidades visuais, conforme visto na Figura 39. Com relação a microestrutura, observou-se que a fração volumétrica entre ferrita e austenita ficou em torno de 50%, formando uma estrutura homogênea, conforme observado na Figura 44 e quantificado na Tabela 05, portanto obteve-se o resultado esperado.

Seguindo para o CP 02, que foi soldado sem alteração dos parâmetros, porém sem a utilização do fluxo de solda, observou-se uma falta de penetração na raiz da solda, obtendo-se fusão em apenas 50% da espessura do corpo de prova conforme visto na Figura 40, isto evidencia a importância da utilização do fluxo na soldagem, que foi a única variação entre o CP 01 e o CP 02. Com relação a microestrutura observa-se que existe uma concentração maior de ferrita em relação a austenita, que continua se apresentando no formato de bastonetes alotriomórficos, conforme a Figura 46.

Seguindo com o último corpo de prova, CP 03, os parâmetros de soldagem foram ajustados para 100A na tentativa de obter uma maior penetração da solda ainda sem a utilização do fluxo. Porém observou-se que mesmo com o aumento da considerável da corrente ainda não se obteve a penetração desejada, mantendo-se em torno de 50% da espessura da amostra, conforme a Figura 41. Este aumento excessivo da corrente ocasionou uma mordedura externa e o deslocamento da zona fundida para o sentido vertical da amostra, como pôde-se observar na macrografia do CP 03. Com relação a microestrutura pode-se observar que o aumento da corrente gerou uma quantidade considerável de ferrita em relação a austenita que ficaram em forma de ilhas cercadas por uma matriz ferrítica, conforme a Figura 48, esta diferença é ainda mais notável se comparado ao CP 01.

Quanto à análise de ferrita, os valores ficaram diferentes para os três corpos de prova que foram de 47,4% para o CP 01, 67,6% para o CP 02 e 68,4% para o CP 03. Isto ocorreu pois o aumento da corrente ocasionou uma maior temperatura e conseqüentemente a formação excessiva de ferrita na superfície do material, isto é um fator que fragiliza o corpo de prova e o deixa suscetível à corrosão.

Considerando a aplicação deste material em ambientes extremamente corrosivos, é importante que ele possua uma boa resistência a corrosão, por este motivo é necessário controlar a formação da ferrita, tendo em vista que a formação desta estrutura ocorre durante o processo de soldagem, onde há um aumento da temperatura, por esta razão é feita a utilização do fluxo de solda, visto que sua função é potencializar a penetração da solda sem que seja necessário aumentar a corrente, reduzindo a temperatura durante a soldagem.

REFERÊNCIAS

CHAVES, Carlos Roberto. **CURSO DE FORMAÇÃO DE OPERADORES DE REFINARIA**: instrumentação básica. Curitiba: Equipe Petrobras, 2002. 98 p. Disponível em: http://www.escolaelectra.com.br/alumni/biblioteca/Termodinamica_ebah.pdf. Acesso em: 25 set. 2022.

COSTA, Raissa Monteito P da. **Corrosão por Cloreto em Aços Inoxidáveis Duplex (AID's)**. 2019. 17 f. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, S.L, 2019. Disponível em: https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio_resumo2019/download/relatorios/CTC/DEQM/DEQM-Raissa%20Monteiro%20P%20da%20Costa.pdf. Acesso em: 10 abr. 2023.

DAVIS, J.R. Stainless Steel - ASM Specialty Handbook. (2.ed.) ASM International. EUA. p. iii, 1996.

FONTANA, M.G., GREENE, N. D. Corrosion engineering. New York: McGraw-Hill Book Company, 1967.

FORTE, Ana Caroline Ferreira. **INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO POR PITE DO AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX SAF 2507**. 2011. 47 f. TCC (Bacharelado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: http://www.eq.ufc.br/TFC/TFC_2011_Forte.pdf. Acesso em: 25 set. 2022.

GARCIA, Rodrigo Roberto Alves. **ESTUDO DA CORROSÃO DO AÇO SUPERDUPLEX UNS S32750 COM DIFERENTES PROPORÇÕES FERRITA/AUSTENITA EM SOLUÇÕES ÁCIDAS CONTENDO CLORETO**. 2012. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://www.metalmat.ufrj.br/index.php/br/pesquisa/producao-academica/dissertacoes/2012/334--312/file>. Acesso em: 04 mar. 2023.

GOMES, E.S.P., VIÑAS, J.B., VATAVUK, J. Aços inoxidáveis duplex - propriedades e aplicações na indústria química. In: Proc. Congresso de Automação e Equipamentos da Indústria Química, ABIQUIM, São Paulo, 1999.

NICHOLLS, J.M. Corrosion properties of duplex stainless steels: general corrosion, pitting and crevice corrosion. IN: Proc. 4th International Conference on Duplex Stainless Steels, Glasgow, Escócia, Nov.1994.

NILSSON, J.-O. Physical metallurgy of duplex stainless steels. In: Proceedings Duplex Stainless Steel 97, 5th World Conference, Maastricht, Holanda, p. 73- 82. Outubro 1997.

PARDAL, Juan Manuel. **EFEITOS DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, MAGNÉTICAS E NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS SUPERDUPLEX**. 2009. 411 f. Tese

(Bacharelado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2009. Disponível em: <https://www.livrosgratis.com.br/ler-livro-online-106171/efeitos-dos-tratamentos-termicos-nas-propriedades-mecanicas-magneticas-e-na-resistencia-a-corrosao-de-acos-inoxidaveis-superduplex>. Acesso em: 25 set. 2022.

SANDVIK STEEL. Corrosion handbook stainless steels. Sandvikens Tryckeri. Sandviken, Suécia, Março 1999.

SENATORE, Marcelo; FINZETTO, Leandro; PEREA, Eduardo. **Ligas Inoxidáveis: estudo comparativo entre os aços inoxidáveis duplex e os inoxidáveis aisi 304l/316l**. 2007. 7 f. Tese (Bacharelado). Rem: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/p6mS8Dm8YptMBckbjqPCwmM/abstract/?lang=pt#>. Acesso em: 28 out. 2022.

SIQUEIRA, Claudia. **TechnipFMC e OneSubsea perto de megacontratos com a Petrobras**. 2021. Disponível em: <https://petroleohoje.editorabrasilenergia.com.br/technipfmc-e-onesubsea-perto-de-megacontratos-no-brasil/>. Acesso em: 10 set. 2022.

SOLOMON, H.D., DEVINE, T.M. Duplex stainless steels - a tale of two phases. IN: LULA, R. A. (Ed.) Proc. Conf. Duplex Stainless Steels'82, ed. ASM, Materials Park, OH, EUA, 1984, p.693-756.

SOUSA, João Matheus Batista Amaro de. **INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA NOS AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX E SUPERDUPLEX UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO : UMA REVISÃO**. 2021. 52 f. TCC (Bacharelado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/60634/3/2021_tcc_jmbasousa.pdf. Acesso em: 25 set. 2022.

STTARRET (org.). **MÁQUINAS DE SERRA DE FITA**. Disponível em: <https://www.starrett.tec.br/Cat%C3%A1logo-de-M%C3%A1quinas-de-Serra-de-Fita--M%C3%A1quinas-de-Sierra-de-Cinta/6/>. Acesso em: 04 mar. 2023.

SWAGELOK (org.). **Orbital Welding System: quick reference guide**. Quick Reference Guide. 2006. Disponível em: <https://northerncl.swagelok.com/welding>. Acesso em: 10 out. 2022.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Materiais para Equipamentos de Processo**. 6.ed. Rio de Janeiro; Interciência, 2003, 3-7p.

WALDÉN, B., NICHOLLS, J.M. The Sandvik duplex family of stainless steel. Summary of data. Publicação S-51-53 da AB Sandvik Steel, Suécia. Abril 1994.