

FUNDAÇÃO SÃO JOÃO BATISTA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CLÁUDIO ANTÔNIO DE OLIVEIRA ROSA
EDUARDO DE CARLI BORGES
FABRINO JOSE AUER MARIN
MARLON COLODETTI GARCIA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE ENERGIA DE SOLDAGEM NA
MICROESTRUTURA E DUREZA DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S 31803**

Aracruz

2019

CLÁUDIO ANTÔNIO DE OLIVEIRA ROSA

EDUARDO DE CARLI BORGES

FABRINO JOSE AUER MARIN

MARLON COLODETTI GARCIA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE ENERGIA DE SOLDAGEM NA
MICROESTRUTURA E DUREZA DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S 31803**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica
das Faculdades Integradas de Aracruz – FAACZ,
como requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. João Paulo Calixto da Silva

Aracruz

2019

CLAÚDIO ANTÔNIO DE OLIVEIRA ROSA

EDUARDO DE CARLI BORGES

FABRINO JOSE AUER MARIN

MARLON COLODETTI GARCIA

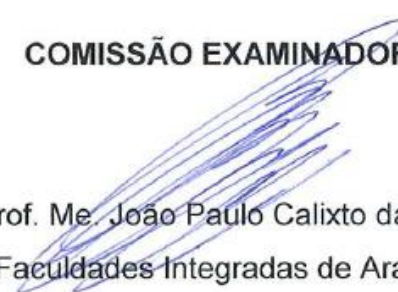
**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE ENERGIA DE SOLDAGEM NA
MICROESTRUTURA E DUREZA DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S 31803**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica
das Faculdades Integradas de Aracruz – FAACZ,
como requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. João Paulo Calixto da Silva

Aprovado em 09 de julho de 2019

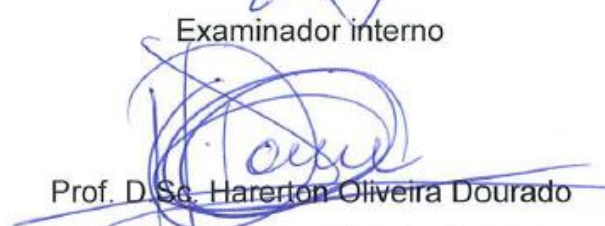
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Me. João Paulo Calixto da Silva
Faculdades Integradas de Aracruz
Orientador



Prof. Me. Vital Pereira Baptista Junior
Faculdades Integradas de Aracruz
Examinador interno



Prof. D. Sc. Harerton Oliveira Dourado
Faculdades Integradas de Aracruz
Examinador interno

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Declaramos, para fins de pesquisa acadêmica, didática e técnico científica, que este Trabalho de Conclusão de Curso pode ser parcialmente utilizado, desde que se faça referência à fonte e aos autores.

Aracruz, 1 de agosto de 2019.

Cláudio Antônio de Oliveira Rosa

Eduardo De Carli Borges

Fabrino Jose Auer Marin

Marlon Colodetti Garcia

*A nossas famílias que sempre estiveram
conosco, aos nobres amigos e aos
professores pelo carinho.*

AGRADECIMENTOS

Queremos expressar o mais sincero agradecimento a todas as pessoas que oportunizaram a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar a Deus, pois permitiu-nos galgarmos essa desejada formação com vida, saúde e inteligência: nossa total gratidão.

A nossas queridas e amadas famílias que sempre apoiaram e incentivaram, tanto nos momentos mais alegres, quanto nas dificuldades: nosso amor.

Em especial a João Paulo Calixto, por guiar-nos com dedicação, compreensão e competência: nosso amigo.

A todos os professores pelo empenho empregado durante todo o curso pela compreensão e paciência: nossa admiração.

A banca avaliadora, por ter o compromisso e a responsabilidade de aceitar essa missão de estarem participando junto conosco desse momento especial: nosso agradecimento.

RESUMO

O aço inoxidável duplex é a família mais sofisticada dos duplex, com ligas muito resistentes à corrosão, com bastante aplicação e futuro no Brasil, principalmente no que diz respeito à costa marítima. Este aço possui um alto teor de cromo, níquel controlado, alto teor de molibdênio, tendo como característica principal possuir austenita e fenita em temperatura ambiente. Para a realização do presente estudo foi realizado um estudo de caso em 3 chapas finas de aço inoxidável UNS S31803 com dimensões de 300x100x10mm utilizando-se como consumível a vareta inox duplex AWS ER2209 com diâmetro de 1,5mm. As chapas foram soldadas pelo processo GTAW com tensão de 24,5V, corrente de 200A e eficiência térmica de 45%. Com a realização do processo percebe-se que as transformações microestruturais e desempenho da junta relacionam-se diretamente com a energia empregada na soldagem e que afetam a Zona Fundida (ZF) e Zona Termicamente Afetada (ZTA). Evidencia-se que quanto maior a energia de soldagem imposta menor é a fase austenita, crescendo dessa forma a fração de fenita na ZF.

Palavras-chave: Aporte térmico. Aço inoxidável. Propriedades Mecânicas. Propriedades Microestruturais.

ABSTRACT

Duplex stainless steel is the most sophisticated family of duplexes, with very corrosion resistant alloys, with a great deal of application and future in Brazil, especially with regard to the sea coast. This steel has a high content of chromium, controlled nickel, high content of molybdenum, having as main characteristic austenite and phenol at room temperature. For the accomplishment of the present study, a case study was carried out on 3 stainless steel plates UNS S31803 with dimensions of 300x100x100mm using as consumable the duplex stainless steel rod AWS ER2209 with a diameter of 1,5mm. The plates were welded by the GTAW process with a voltage of 24.5V, a current of 200A and a thermal efficiency of 45%. With the realization of the process it is noticed that the microstructural transformations and the performance of the joint are directly related to the energy used in the welding and that affect the ZF (ZF) and Thermally Affected Zone (ZF). It is evidenced that the higher the welding energy imposed the smaller the austenite phase, thus increasing the phenol fraction in the ZF.

Keywords: Thermal input. Stainless steel. Mechanical properties. Microstructural properties..

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1 – Balanceamento de níquel como elemento de liga para composição da microestrutura do aço inoxidável duplex.	14
Figura 2 – Microestrutura do aço duplex UNS S 31803.	15
Figura 3 – Processo de soldagem GTAW	21
Figura 4 – Chapas utilizadas no estudo de caso.	29
Figura 5 – Modelo de chanfro utilizado para estudo.....	30
Figura 6 – Máquina utilizada no processo de soldagem	32
Figura 7 - Especificações técnicas da máquina de solda usada no estudo	32
Figura 8 – Máquina Politriz utilizada para polimento e limpeza de peças cortadas...34	
Figura 9 – Ataque eletroquímico aplicado às peças em estudo.	34
Figura 10 – Microscópio metalográfico utilizado para análise microestrutural	35
Figura 11 – Máquina de dureza Vickers.....	36
Figura 12 – Penetrador utilizado para ensaio de dureza.....	36
Figura 13 – Microestruturas dos metais de solda obtidas a partir das energias de soldagem, ampliadas em 400x, utilizando-se a) 0,6kJ/mm b) 1,8kJ/mm c) 3,0kJ/mm.	38
Figura 14 – Microestruturas das ZTA conquistadas a partir dos diferentes apostes térmicos sofridos pelas amostras, ampliadas em 100x e usando a) 0,6 kJ/mm b) 1,8 kJ/mm c) 3,0kJ/mm.	39
Figura 15 – Impressão deixada no corpo de prova durante ensaio de dureza Rockwell	43
Gráfico 1 – Relação velocidade x aporte térmico sofrido pelas amostras	37
Gráfico 2 – Perfil de microdureza Vickers das amostras com base no aporte térmico sofrido.	40

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 – Classificação dos processos de soldagem quanto à fonte de energia e tipologia de proteção	18
Quadro 2 – Classificação dos processos de soldagem de acordo com a natureza da união	20
Tabela 1 – Caracterização química dos principais aços inoxidáveis.....	13
Tabela 2 – Propriedades físicas do aço inoxidável UNS S 31803.....	16
Tabela 3 – Aporte térmico para os principais processos de soldagem.	24
Tabela 4 – Propriedades químicas do aço inoxidável UNS S31803	30
Tabela 5 – Propriedades mecânicas do aço inoxidável UNS S31803.....	30
Tabela 6 – Propriedades físicas do aço inoxidável UNS S31803.....	30
Tabela 7 – Características químicas do consumível utilizado no estudo.	31
Tabela 8 – Parâmetros utilizados durante o processo de soldagem	33
Tabela 9 – Aporte térmico identificado durante o processo de soldagem das amostras.	37
Tabela 10 – Medições de dureza HRA para aporte térmico de 0,6 KJ/mm.....	41
Tabela 11 – Medições de dureza HRA para aporte térmico de 1,8 KJ/mm.....	42
Tabela 12 – Medições de dureza HRA para aporte térmico de 3,0 KJ/mm.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS

Along. – Alongamento

Comp. - Comprimento

Coords. – Coordenadores

Diâm. – Diâmetro

Esc. - Escoamento

Et. al – *Et alii* (e outros)

Máx. – Máximo

Me. – Mestre

P. – Página

Prof. – Professor

Rup. - Ruptura

LISTA DE SIGLAS

A – Ampère

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – *American Iron and Steel Institute*

AWS – *American Welding Society*

C – Carbono

°C – Graus Celsius

Cr – Cromo

Cu – Cobre

e_a – Eficiência do arco.

ES – Espírito Santo

FAACZ – Faculdades Integradas de Aracruz

Fe - Ferro

GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*

HT – Aporte térmico

H_l – é o aporte líquido de energia

H_t – é o aporte de energia total

HRA – Dureza Rocwell

HV – Microdureza Vickers

I – é corrente de soldagem

IFES – Instituto Federal do Espírito Santo

IMOA – *International Molybdenum Association*

ISO – *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização)

J – Joule

J/cm – Joule por centímetro

J/Kg°C – Joule por quilograma e por grau Celsius

k – difusividade térmica do material

kgf – quilograma força

kJ/mm – Quilo Joule por milímetro

kN - quilonewton

MAG – *Metal Active Gas*

MIG – *Metal Inert Gas*

mm – milímetro
mm/min – milímetro por minuto
mm/s – milímetro por segundo
Mn – Manganês
Mo – Molibdênio
MPa – Mega Pascal
N – Nitrogênio
N - Newton
NBR's – Normas Brasileiras Regulamentadoras
NBRNM
Ni – Níquel
NM – Níquel e Molibdênio
P - Fósforo
r – distância na qual o calor se propaga
s – segundos
S - Enxofre
Si – Silício
t – instante gasto pela propagação do calor
TIG – *Tungsten Inert Gas*
UNS – *Unifield Nubering System*
V – é a tensão do arco
V - Volts
v – é a velocidade de avanço
W – Tungstênio
W/m°C – Watt por metro por grau Celsius
ZAC – Zona Afetada pelo Calor
ZF – Zona Fundida
ZTA – Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS.....	10
1.1.1	Objetivo geral	10
1.1.2	Objetivos específicos	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	AÇO INOXIDÁVEL	12
2.1.1	Aço inoxidável duplex	12
2.1.1.1	Propriedades químicas.....	13
2.1.1.2	Microestruturas	14
2.1.1.3	Propriedades mecânicas.....	15
2.1.1.4	Propriedades físicas	16
2.1.1.5	Resistência à corrosão	16
2.2	SOLDAGEM	17
2.2.1	Classificação dos processos de soldagem	18
2.2.1.1	Caracterização do processo Tungsten Inert Gas (TIG) ou Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)	21
2.2.2	Transferência de calor no processo de soldagem Gas Tungsten Arc Welding (GTAW): aporte térmico	22
2.2.2.1	Zona Termicamente Afetada (ZTA).....	24
2.2.2.2	Zona Fundida (ZF)	24
2.2.2.3	Aporte térmico em chapas finas	25
2.2.3	Qualidade dos serviços de soldagem.....	26
2.2.4	Patologias que podem ocorrer na soldagem	26
2.2.4.1	Patologias causadas pelo aporte térmico de soldagem	27
3	METODOLOGIA.....	29
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	29
3.1.1	Metal de base	29
3.1.2	Vareta para soldagem.....	31
3.1.3	Eletrodo	31
3.1.4	Fonte de soldagem	31
3.2	MÉTODOS DE SOLDAGEM	33
3.2.1	Procedimentos de soldagem	33

3.2.2	Energia de soldagem.....	33
3.2.3	Análise microestrutural.....	34
3.2.4	Ensaio de microdureza.....	35
3.2.5	Ensaio de dureza	36
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	37
4.1	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	37
4.2	ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS	40
4.3	ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL.....	41
5	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	45
	ANEXO I – NBR's NO CAMPO DE SOLDAGEM	49

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis duplex são aços que possuem boas propriedades mecânicas, além de ótima resistência à corrosão. Estas características o tornaram bastante solicitados em indústrias química e petroquímica, de papel e celulose, siderúrgicas, alimentícias e de geração de energia (SENATORE, FINZETTO, PEREA, 2007).

Contudo, para que o aço inoxidável seja devidamente aplicado nas diversas utilidades que lhe são conferidas é necessário que o mesmo passe por processos que garantam o formato necessário para o projeto. O mais comum desses processos é a soldagem. Segundo Fonseca, Pinheiro e Silva (2016) os processos de soldagem podem mitigar alterações nas propriedades do material. Sendo assim é necessária que seja realizada uma escolha adequada dos parâmetros de soldagem a ser aplicada.

Os autores supracitados mencionam que as características balanceadas existentes na composição dos aços inoxidáveis os confere excelentes propriedades mecânicas no que tange à tração, redução de seção, economia de peso e resistência à corrosão o que torna este material tão atrativo no que tange à uma produção econômica.

Entretanto, o processo de fabricação da peça a ser utilizada ou até mesmo a utilização de uma peça já preparada exige cuidado, uma vez que muitas das alterações atingidas nestas peças estão diretamente relacionadas à soldagem.

Com base em tais preceitos, compreender os fenômenos térmicos que ocorrem durante o processo de soldagem de uma peça de aço inoxidável torna-se relevante para o conhecimento dos efeitos que o aporte térmico pode gerar às propriedades mecânicas e micro estruturais do aço para que assim seja possível encontrar medidas de controle de tais variáveis.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar o efeito da variação da energia de soldagem na microestrutura e dureza do aço inoxidável duplex UNS S 31803.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar as microestruturas resultantes das variações dos parâmetros de soldagem;
- Realizar ensaio de microdureza Vickers, de modo a traçar o perfil de dureza dos corpos de prova;
- Realizar ensaio de dureza Rockwell;
- Investigar a relação entre o resultado da dureza Rockwell e da microdureza Vickers.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 AÇO INOXIDÁVEL

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas que contêm no mínimo de 10 a 12% em peso de Cromo (MODENESI, 2001), podendo possuir outros elementos em sua composição. A nomenclatura inoxidável se deve à resistência à corrosão em meios aquosos, na presença de inúmeros agentes orgânicos e minerais agressivos (CASTRO E CADENET, 1975).

Segundo Coutinho (1992) a composição dos aços inoxidáveis é o que confere aos mesmos a característica de inoxidação viabilizando assim o uso destes em aplicações que requeira resistência ao calor e à fluência.

O autor supracitado classifica os aços inoxidáveis em quatro grupos: aços inox martensíticos; aços inox de transformação controlada; aço inox ferríticos e aços inox austeníticos. Contudo para o estudo apresentado será estudado um grupo não mencionado acima pelo autor, o aço inox duplex, como será demonstrado a seguir.

2.1.1 Aço inoxidável duplex

Segundo Senatore, Finzetto e Perea (2007) o aço inoxidável duplex é o nome dado à classe de materiais com microestrutura bifásica que se compõem por uma matriz férrica e ilhas de austenita. Esta composição se encontra balanceada entre frações volumétricas próxima de 50% para cada uma das fases viabilizando a maximização da propriedade mecânica relacionadas a tais componentes (PINHEIRO, SILVA, 2016). Estes tipos de aço vêm apresentando uma crescente utilização tendo em vista as aplicações industriais que exigem maior resistência à corrosão e oxidação, além de tenacidade adequada.

Segundo Videira (2016) o teor de Carbono (C) nos aços inoxidáveis duplex não excede 0,03%, estes aços possuem inúmeras vantagens em relação aos aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos com uma resistência que chega ao dobro da apresentada por estes e sem perder a boa tenacidade e soldabilidade.

2.1.1.1 Propriedades químicas

Segundo Chiaverini (2015) os aços inoxidáveis duplex possuem estrutura bifásica ferrítico-austenítica que são determinadas principalmente pelos teores de ferro (Fe), cromo (Cr) e níquel (Ni).

Sendo assim cada tipo de aço inoxidável duplex possui composições químicas próprias como apresentado na Tabela 1. Estas características são as responsáveis pela classificação e compreensão do comportamento de cada tipo de aço frente aos processos de soldagem (que serão estudados no próximo capítulo).

Tabela 1 – Caracterização química dos principais aços inoxidáveis.

AISI/UNS	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%N	%Cu	Microestrutura
	máx.								
304 L	0,03	0,5	1,3	18,5	10	-	-	-	Austenita
316 L	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,	-	Duplex

Fonte: SENATORE, FINZETTO, PEREA (2007, p. 176).

Baseando-se nas propriedades químicas dos aços duplex Ramírez-Londoño *apud* Videira (2016) classifica-os em quatro grupos os quais são descritos abaixo:

Fe-23%Cr-4%Ni-0,1N: aços de baixo custo e sem molibdênio;

Fe-22%Cr-5,5%Ni-3%Mo-0,15%N: aços com resistência a corrosão intermediária entre os aços AISI 316 e os superausteníticos do tipo 6%Mo+N;

Fe-25%Cr-5%Ni-2,5%Mo-0,17%N-Cu: aços com boa resistência a corrosão podendo conter adições de tungstênio (W).

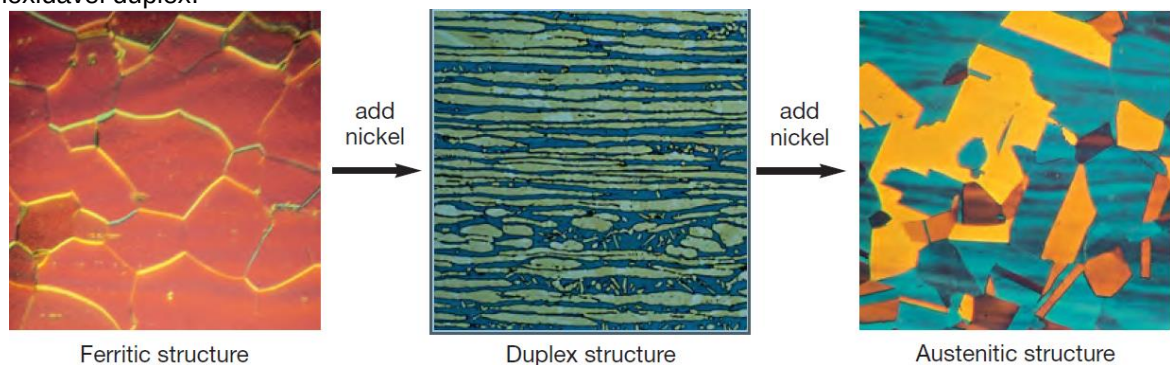
Fe-25%Cr-7%Ni-3,5%Mo-0,25%N-W-Cu: aços inoxidáveis superduplex com maior resistência a corrosão.

Dessa forma, em posse de tais informações e com base na Tabela 1 supracitada é possível classificar o aço duplex S 31803, objeto do presente estudo, como um aço de média liga por apresentar resistência à corrosão intermediária entre os austeníticos comuns e aços inoxidáveis superausteníticos com 5 a 6% de Molibdênio (Mo) (SENATORE, FINZETTO, PEREA, 2007).

2.1.1.2 Microestruturas

A Figura 1 mostra como a microestrutura de um aço inoxidável duplex é obtida por meio de balanceamento de elementos de liga.

Figura 1 – Balanceamento de níquel como elemento de liga para composição da microestrutura do aço inoxidável duplex.



Fonte: INTERNATIONAL MOLYBDENUM ASSOCIATION (IMOA) (2009, p. 9).

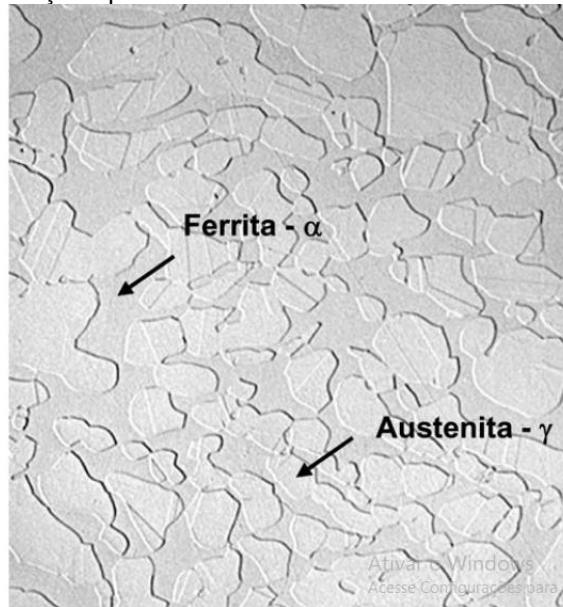
A Figura 1 mostra como um aço inoxidável ferrítico ao receber adição de níquel se torna um aço inoxidável duplex que, por sua vez, ao receber uma adição maior de níquel pode se tornar aço inoxidável austenítico.

Videira (2016, p. 28) esclarece “que um aço inoxidável duplex com composição aproximada de 6%Ni e 24%Cr, começa com uma solidificação completamente ferrítica, à medida que o resfriamento promove a transformação de parte da ferrita em austenita”.

O balanceamento dos elementos de liga, nos aços inoxidáveis duplex tem, por objetivo, controlar os teores de elementos estabilizadores de austenita, ou gamagênicos, tais como níquel (Ni), carbono (C), nitrogênio (N) e de elementos estabilizadores da ferrita, ou alfa-gênicos, cromo (Cr), molibdênio (Mo) e silício (Si) (SENATORE, FINZETTO, PEREA, 2007).

Assim é perceptível que à temperatura ambiente o aço duplex possui uma microestrutura bifásica de austenita e ferrita (VIDEIRA, 2016), como ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Microestrutura do aço duplex UNS S 31803.



Fonte: SENATORE, FINZETTO, PEREA (2007, p. 177)

O balanceamento entre os dois componentes do aço, como ilustrado na Figura 2 é o responsável por garantir ao aço inoxidável em estudo características mecânicas como o limite de escoamento duas vezes maior que o limite dos aços ferríticos (SENATORE, FINZETTO, PEREA, 2007). De acordo com Senatore, Finzetto e Perea (2007) as propriedades mecânicas dos referidos aços são melhoradas à medida que se consegue chegar mais próximo da proporção de 50% de austenita para 50% de ferrita.

2.1.1.3 Propriedades mecânicas

Segundo Senatore, Finzetto e Perea (2007) os aços inoxidáveis em estudo apresentam alta resistência ao impacto na temperatura ambiente (25°C) e possuem tenacidade limitada à fração volumétrica e distribuição da ferrita

De acordo com os autores acima o aço UNS S 31803 possui resistência ao escoamento de 450 MPa, e resistência à tração entre 680 e 800 Mpa.

Estes dados confirmam a informação de que as propriedades mecânicas desses aços são superiores às dos aços inoxidáveis com apenas estrutura austênica, esta característica se deve a formação da estrutura granular mais fina conferida devido ao encrutamento e recristalização particulares (CHIAVERINI, 2015).

Solomon e Devine (1982) ponderam que as fases austenita e principalmente ferrita refletem as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis duplex uma vez que a

segunda adicionada à primeira objetiva aumentar o limite de escoamento do aço duplex especialmente em baixas temperaturas.

Estes aços apresentam excelente resistência ao impacto em temperatura ambiente e tenacidade limitada a distribuição de ferrita, contudo, com uma fração volumétrica de austenita em torno de 40% pode ocorrer o aparecimento de trincas (ATAMERT, KING, 1992).

2.1.1.4 Propriedades físicas

Segundo estudos realizados por Senatore, Finzetto e Perea (2007) o aço UNS S 31803 possui características físicas próprias como apresentado na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Propriedades físicas do aço inoxidável UNS S 31803

Calor específico J/Kg°C			Condutibilidade térmica W/m°C		
20°C	200°C	400°C	20°C	200°C	400°C
480	530	590	14	17	20

Fonte: SENATORE, FINZETTO, PEREA (2007, p. 177).

“Devido à presença da fase ferrita, os aços inoxidáveis duplex possuem menor coeficiente de expansão térmica que os austeníticos, fazendo com que estas ligas apresentem comportamento próximo ao dos aços carbono” (ROLDÃO, 2010, p. 13).

2.1.1.5 Resistência à corrosão

“A resistência à corrosão é determinada pela capacidade que esses materiais têm de se passivar e permanecer nesse estado no ambiente a que estiver exposto” (SENATORE, FINZETTO, PEREA, 2007, p. 178).

A resistência à corrosão do aço em estudo está diretamente relacionada aos elementos presentes em sua composição química, ou seja, percentual de Carbono (C), Silício (S), Manganês (Mn), Cromo (Cr), Níquel (Ni), Molibdênio (Mo), Nitrogênio (N) e Cobre (Cu) conforme já apresentado no item 2.1.1 do presente estudo.

Dentre estes elementos químicos o Cr é o principal responsável pela resistência de agentes corrosivos em aços. Segundo Chiaverini (2015) quando usado em elevados teores – acima de 10% - este elemento é o mais eficiente de todos.

Chiaverini (2015) acrescenta que em se tratando da corrosão atmosférica o Cu também pode ser um grande aliado, bastando teores de 0,2% para que retarde definitivamente este processo.

Senatore, Finzetto e Perea (2007) acrescentam que além destas características fatores como tamanho de grão, distribuição e morfologia de inclusões, precipitação de fases e qualidade da superfície também exercem influência direta sobre a resistência à corrosão do aço duplex.

Sobre este ponto Chiaverini (2015) acrescenta que as condições da superfície pode diminuir a probabilidade de corrosão pela presença de superfícies macias, isenção de defeitos superficiais, isenção de casca de óxido entre outros. Ou seja, quanto mais polida menor a chance de ação corrosiva.

O autor supracitado esclarece também que as fissuras formadas em juntas e conexões ou em pontos de contato entre o metal e substâncias não metálicas são grandes agravantes para a ocorrência da corrosão em peças de aço.

Assim conclui-se que a corrosividade do aço inoxidável está centrado em características químicas, passividade e ausência de condições oxidantes.

2.2 SOLDAGEM

Segundo Brandi (2004) o processo de soldagem trata-se da união entre duas partes metálicas por meio de fonte de calor podendo aplicar ou não pressão. O resultado deste processo é denominado solda.

Este processo é utilizado atualmente em diversas áreas, sendo responsável pela fabricação de produtos e estruturas metálicas, aviões e até mesmo veículos espaciais. Desse modo, tendo em vista as diversas áreas de aplicação, existem diferentes tipos de processo de soldagem.

Contudo existem alguns requisitos que devem ser preenchidos por todos os processos de soldagem como a geração de determinada quantidade de energia capaz de unir dois materiais similares ou não; remoção das contaminações das superfícies a serem unidas; evitar que o ar atmosférico contamine a região durante a soldagem; propiciar o controle da transformação de fase, para que a solda alcance as propriedades desejadas, sejam elas físicas, químicas ou mecânicas (BRANDI, 2004).

Vale ressaltar aqui que a qualidade da solda está ligada não apenas ao cumprimento dos requisitos acima mencionados, mas também de um conjunto de áreas que estão inter-relacionadas entre si e que devem ser devidamente observadas as quais citam-se o projeto do equipamento soldado, os materiais utilizados e a soldabilidade destes.

2.2.1 Classificação dos processos de soldagem

Os processos de soldagem podem ser classificados quanto à fonte de energia e tipo de proteção ou a partir da natureza da união.

Quanto à fonte de energia o processo de soldagem se divide em Mecânico, Químico, Elétrico e Energia Radiante, já o tipo de proteção pode ser dividido em Vácuo, Gás Inerte, Gás, Fluxo (escória) e Sem Proteção, como ilustrado pelo Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação dos processos de soldagem quanto à fonte de energia e tipologia de proteção

Fonte de energia			Tipos de proteção				
			Vácuo	Gás inerte	Gás	Fluxo (escória)	Sem proteção
Mecânica						N	Explosão Átrio Ultra-som
Química	Chama		N		Oxiacetilência		
	Reação exotérmica		N			Aluminotermia	
Elétrica	Resistência elétrica		N	N	N	Eletroescória	Topo-a-topo Ponto Ressalto Costura
	Arco elétrico	Eletrodo consumível	N	MIG	Eletrodo tubular		Soldagem de prisioneiros
					MAG	Eletrodo revestido Arco submerso	
			Eletrodo não consumível	N	TIG		
Energia radiante	Eletromagnética			Laser		N	N
	Partículas		Feixe de elétrons		N	N	N
N - Não							

Fonte: BRANDI (2004, p. 2)

Sobre as fontes de energia que podem ser empregadas no processo de soldagem Brandi (2004, p. 6-7) assim as define:

Fonte mecânica: o calor é gerado por atrito ou por ondas de choque, ou por deformação plástica do material.

Fonte química: o calor é gerado por reações químicas exotérmicas como, por exemplo, a queima de um combustível (chama) ou a reação de oxidação do alumínio.

Fonte elétrica: o calor é gerado ou pela passagem de corrente elétrica ou com a formação de um arco elétrico. No primeiro caso, o aquecimento é realizado por efeito Joule (J), enquanto no segundo é através do potencial de ionização, corrente e outros parâmetros de soldagem.

Fonte radiante: o calor é gerado por radiação eletromagnética (laser) ou por um feixe de elétrons acelerados através de um potencial.

No que tange à natureza da união o autor supracitado enfatiza que deve ser primeiramente realizada a distinção entre soldagem no estado sólido e por fusão, como apresentado no Quadro 2 a seguir.

Quadro 2 – Classificação dos processos de soldagem de acordo com a natureza da união

Estado sólido	A frio	Explosão				
		Ultra-som				
	A quente	Atrito				
		Difusão				
Fusão	Aluminotermia					
	Feixe se elétrons					
	Laser					
	Gás	Brasagem				
		Soldabrasagem				
		Oxiacetilência				
	Resistência elétrica	Eletoescória				
		Resistência	Ponto			
			Topo-a-topo			
			Ressalto			
	Costura					
	Arco elétrico	Proteção de gases	Eletrodo não consumível	Plasma		
				TIG		
			Eletrodo consumível	MIG	Transferência globular/curto-circuito	
					Transferência por pulverização	
					Pulsado	
				MAG	Transferência globular	
					Transferência por curto-circuito	
					Eletrodo tubular	
			Proteção de escória	Eletrodo tubular		
Eletrodo revestido						
Arco submerso						
Sem proteção		Soldagem de prisioneiro				

Fonte: BRANDI (2004, p. 2)

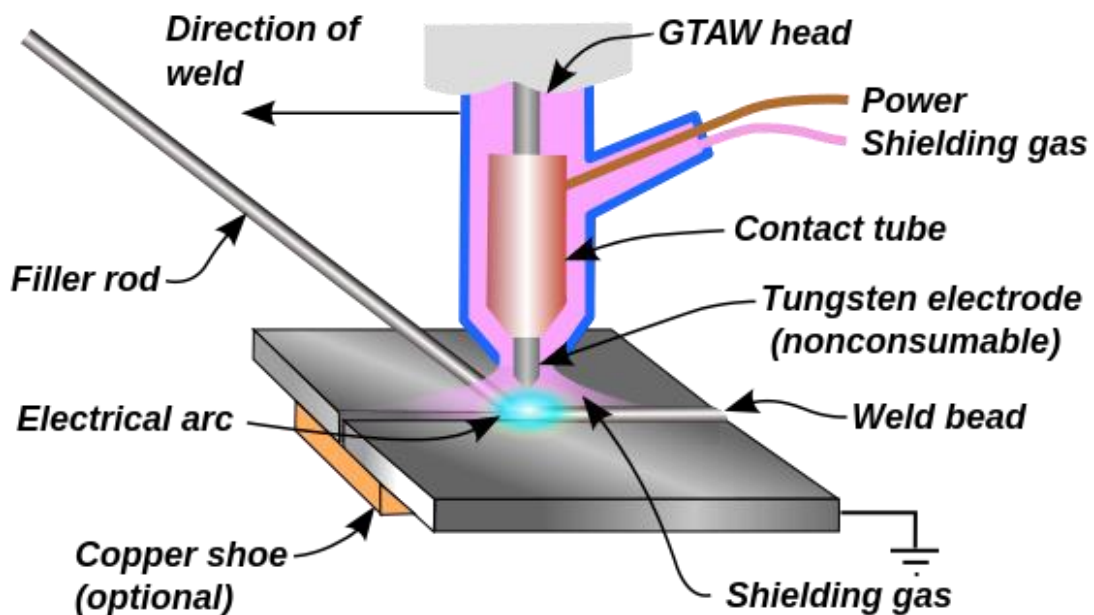
Segundo Pereira (2009) é necessário sempre levar em conta que a promoção da fusão entre as partes a serem soldadas pode ser realizada por meio da utilização de arco elétrico ou a resistência elétrica, através do aquecimento por efeito Joule. O autor esclarece que no primeiro envolve-se a soldagem a ponto, soldagem com costura, soldagem topo-a-topo e soldagem com ressalto, enquanto que no segundo há uma subdivisão entre soldagem com eletrodo consumível que inclui os processos de soldagem eletrodo revestido, MIG/MAG, eletrodo tubular e arco submerso e soldagem com eletrodo não-consumível que engloba os processos TIG e a plasma.

2.2.1.1 Caracterização do processo Tungsten Inert Gas (TIG) ou Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

Como já mencionado anteriormente, cada processo de soldagem apresenta suas características próprias. Porém para o estudo apresentado será abordado apenas o processo Tungsten Inert Gas (TIG) ou GTAW.

Este processo utiliza, segundo Brandi (2004), um arco elétrico como fonte de calor, mantido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça a ser soldada, havendo para tanto a necessidade de proteção feita por um fluxo de gás inerte como ilustra a Figura 3 para peça a ser soldada.

Figura 3 – Processo de soldagem GTAW



Fonte: WELDINGIS (2017)

Este é um processo que tem sido mais utilizado na soldagem de materiais com ligas de alumínio, de magnésio, de titânio, e aços inoxidáveis, este fato deve-se a boa qualidade da solda produzida.

Pereira (2009) esclarece que o eletrodo não-consumível empregado neste processo de soldagem constitui-se de tungstênio puro ou ligado a outros elementos químicos que tendem a aumentar a capacidade de emissão de elétrons, permitindo ainda uma vida útil mais duradoura ao eletrodo.

“As varetas ou arames de metal de adição para TIG têm basicamente a mesma composição química dos materiais de base; não é esperada nenhuma reação química na poça de fusão” (PEREIRA, 2009, p. 43).

Segundo Brandi (2004) a solda TIG apresenta algumas vantagens e limitações. As vantagens descritas pelo autor dizem respeito à produção de soldas de alta qualidade, solda a maioria dos metais e ligas, poça de fusão calma, fonte de calor concentrada, minimizando a Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e distorções e processo de fácil aprendizagem.

Pereira (2009) aponta ainda como vantagens deste processo o excelente controle de calor cedido à peça em decorrência do controle independente da fonte de calor e adição de metal de enchimento, tornando o processo vantajoso para peças com pequena espessura.

Pereira (2009, p. 43) acrescenta ainda:

Como o eletrodo não é consumido, há possibilidade da soldagem sem adição de metal de enchimento, tornando o processo ainda mais interessante na soldagem de chapas finas. Outra vantagem que pode ser descrita é a não existem reações metal-gás e metal-escória, há pouca geração de fumos e vapores, permitindo ótima visibilidade ao soldador.

No que tange às limitações deste processo o Brandi (2004) menciona ser um processo com baixa taxa de deposição, impossibilidade de soldagem em locais com corrente de ar, possibilidade de inclusão de tungstênio na solda e emissão intensa de radiação ultravioleta.

Pereira (2009) adiciona que este processo apresenta desvantagem pelo alto custo de equipamentos e consumíveis utilizados, além da baixa produtividade/rendimento do processo.

2.2.2 Transferência de calor no processo de soldagem Gas Tungsten Arc Welding (GTAW): aporte térmico

Durante o processo de soldagem GTAW há uma transferência de calor para a junta a ser soldada. Segundo Taniguchi (2004) durante este processo são liberadas basicamente três partes da energia. A primeira parte é dissipada para a atmosfera, a segunda parte convertida em proteção da poça de fusão e a última é efetivamente usada na soldagem.

Assim a quantidade de energia direcionada efetivamente à solda é chamada de aporte térmico ou insumo de calor (FONSECA *et. al*, 2016) se correlaciona a quantidade de energia disponível para a soldagem com a velocidade de avanço do eletrodo. Esta relação pode ser definida pelas seguintes equações:

(1)

$$H_t = \frac{V \cdot I}{1000 \cdot v} \text{ (J/cm)} \quad (2)$$

$$H_l = \frac{e_a \cdot V \cdot I}{1000 \cdot v} \text{ (J/cm)}$$

Onde: H_t – é o aporte de energia total

V – é a tensão do arco

I – é corrente de soldagem

v – é a velocidade de avanço

H_l – é o aporte líquido de energia

e_a – é a eficiência do arco.

A Equação 1 permite identificar o aporte de energia total, porém é por meio da Equação 2 que se define o aporte de energia efetivamente disponível para a soldagem (TANIGUCHI, 2004).

Os ciclos térmicos ocorridos durante a soldagem dos materiais é de grande relevância visto que os mesmos influenciam diretamente na estrutura cristalina e propriedades finais dos mesmos.

Segundo Fonseca *et. al* (2016) o aporte térmico é uma adequação muito importante ao material escolhido, ao processo e parâmetros de soldagem.

Certa feita nota-se que cada processo possui faixas de aporte adequadas ao material a ser usado como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Aporte térmico para os principais processos de soldagem.

PROCESSO	H (kJ/mm)
Eletrodo revestido	0,5 – 3,0
Arco submerso	1,0 – 10
TIG	0,3 – 1,5
MIG	0,5 – 3
Eletroescória	5,0 – 50
Feixe de elétrons	0,1 – 0,6

Fonte: FONSECA et. al (2016, p. 3)

A Tabela 3 evidencia que o processo aplicado no presente estudo possui um aporte limitável entre 0,3 e 1,5 kJ/mm.

2.2.2.1 Zona Termicamente Afetada (ZTA)

Segundo Fonseca *et al.* (2016) a Zona Termicamente Afetada (ZTA) pode ser definida como a região onde ocorrem as transformações no estado sólido durante o processo de soldagem. “No período de permanência em alta temperatura na soldagem dos aços, nessa zona ocorrem transformações de fase e portanto mudanças microestruturais marcantes” (PEREIRA *et. al*, 2016, p. 2).

Pereira (2009) afirma que para a determinação da ZTA é necessário o conhecimento de condições de resfriamento e aquecimento com relação a temperatura máxima atingida e o tempo de permanência na mesma, sendo esta relação consequência da espessura do material, energia de soldagem, temperatura de pré-aquecimento e de interpasses. Assim sendo a ZTA é definida pelo ciclo térmico do processo de soldagem, sendo este ciclo responsável pela microestrutura desta zona.

2.2.2.2 Zona Fundida (ZF)

Fonseca *et. al* (2016) afirma que Zona Fundida (ZF) pode também ser denominada região da poça fundida e reproduz em baixa escala os fenômenos que ocorrem no processo de solidificação de uma liga metálica tais como nucleação e crescimento de cristais, segregação, porosidade e formação de estruturas colunares ou equiaxiais.

A solidificação da poça de fusão nas soldas nos aços em estudo é influenciada pelo tamanho de grão do metal de base adjacente à zona de fusão e da orientação cristalina do mesmo (PEREIRA, 2009).

De acordo com Pereira (2009) a solidificação da poça de fusão caracteriza-se pelo aumento competitivo entre os grãos que ocorrem pela tendência dos cristais crescerem preferencialmente segundo certas direções cristalinas.

2.2.2.3 Aporte térmico em chapas finas

“Para as soldagens em chapas finas, ocorre aumento da temperatura do material em níveis suficientes para reduzir a taxa de resfriamento, permitindo a formação de fases intermediárias como a fase sigma e outros precipitados como nitretos ou carbonetos” (ROLDÃO, 2010, p. 47).

Segundo Taniguchi (2004) o regime no qual ocorre a transferência de calor em uma chapa fina é definido como quase-estacionário, ou seja, a distribuição de temperatura é constante para um observador postado sobre uma fonte/coordenada móvel movimentando-se juntamente com ela a uma velocidade determinada.

O autor supracitado pondera que nos processos de soldagem é relevante a definição de constante de tempo, sendo esta a responsável por permitir que se atinja o regime quase-estacionário mencionado acima.

A constante de tempo permite avaliar o lapso de tempo decorrido desde o início do processo de soldagem até o instante em que a distribuição de temperatura passa a ser permanente para o observador postado sobre uma fonte móvel (TANIGUCHI, 2004). A definição da referida constante pode ser encontrada pela seguinte equação:

$$\frac{r^2}{kt} = 16 \quad (3)$$

Onde: r – é a distância na qual o calor se propaga definida por $v.t$, onde v é a velocidade;

t – é o instante gasto pela propagação do calor e;

k – é a difusividade térmica do material.

2.2.3 Qualidade dos serviços de soldagem

Tendo em vista as áreas em que a soldagem pode e/ou deve ser aplicada, como é o caso da construção de estruturas e até mesmo de um reator de central nuclear, o processo de soldagem deve cumprir parâmetros que lhe garantam uma qualidade incontestável.

Assim Branchini (2004) aponta como medidas para se garantir a qualidade da soldagem a análise criteriosa do material de base para que desse modo haja a execução correta de cálculos envolvendo todo o processo de soldagem a ser realizado evitando desse modo erros nas escolhas de equipamentos, técnicas e materiais adequados ao projeto. O autor menciona também a necessidade de se parametrizar a solda a ser executada; escolha do metal de adição mais adequado; qualificação da mão-de-obra; planejamento e por fim a execução coerente do projeto pretendido.

Tendo em vista o grande número de preceitos a serem abordados para uma efetiva qualidade da soldagem é possível perceber que o planejamento é fundamental para a execução de um projeto efetivo e que não apresente patologias.

Além do planejamento é possível também adotar o registro da realização do processo como uma forma de cuidar da qualidade visto que havendo algum inconveniente os registros poderão esclarecer dúvidas e sanar problemas.

Assim, tendo em vista a necessidade de uma qualidade efetiva da soldagem a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por meio das Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBR's) elencadas no Anexo I estabelece as normas de uso obrigatório no país (BRANCHINI, 2004).

2.2.4 Patologias que podem ocorrer na soldagem

Pereira (2009) afirma que os processos de soldagem, como mencionado anteriormente, envolvem a aplicação de calor localizado podendo ainda apresentar deformação plástica e estas situações influenciam diretamente para que ocorram alterações das propriedades do material porém estas nem sempre são desejáveis.

2.2.4.1 Patologias causadas pelo aporte térmico de soldagem

Como já mencionado anteriormente a transferência de calor decorrente do processo de soldagem é grande responsável pela alteração em diversas propriedades do material submetido a solda, devendo para tanto ser devidamente observado as características desse material para que então se defina qual o processo mais adequado a ser utilizado.

Segundo Taniguchi (2004) o aporte térmico ocorrido durante o processo de soldagem é responsável tanto por problemas metalúrgicos como estruturais à área soldada. Uma dessas patologias está relacionada à ocorrência de deformações residuais e, por consequência, o aparecimento de tensões residuais na junta soldada e suas adjacências.

Taniguchi (2004) classifica as alterações residuais como sendo de origem térmica e de natureza plástica e podem dar origem a outras patologias nas áreas soldadas, como propagação de trincas, corrosão sob tensão, fadiga, entre outros. Estas patologias podem comprometer totalmente as estruturas soldadas.

Castro (2011) em um estudo realizado sobre o efeito de aporte térmico na soldagem de reparos embutidos em minerodutos identificou as seguintes patologias ocasionadas pelos ciclos térmicos:

- **Trincas de solidificação:** podem surgir enquanto a temperatura da solda ainda se encontra elevada, relacionando-se à solidificação. O crescimento destas trincas ocorrem devido às tensões de resfriamento, sendo ocasionada pela baixa solubilidade de elementos de liga. Segundo o autor estas trincas ocorrem no centro da solda e podem se estender por toda a solda.
- **Trincamento a frio induzido pelo hidrogênio:** de acordo com Castro (2011) este tipo de trinca ocorre algum tempo depois da solda realizada e se torna crítica e mais perigosa que a trinca a quente uma vez que depende de procedimentos especiais para serem resolvidas. Esta patologia coloca em risco a integridade de peças, equipamentos e estruturas, podendo incorrer em fraturas catastróficas.
- **Falta de penetração:** refere-se ao não enchimento completo da raiz da junta soldada, podendo ser causada por diversos fatores como a manipulação incorreta do eletrodo ou até mesmo projeção inadequada da junta.
- **Mordedura:** tratam-se de reentrâncias agudas que surgem pela ação da fonte de calor do arco entre um passe de solda e o metal base ou entre passas adjacentes.

- **Inclusões de escória:** são partículas sólidas não-metálicas aprisionadas entre os passes de solda ou na linha de fusão.
- **Porosidade:** ocorre, segundo Castro (2011), pelo uso de técnicas incorretas, utilização de metal de base sem limpeza adequada ou por eletrodo úmido.
- **Falta de fusão:** é a ausência da união das partes por fusão sendo causada por um aquecimento inadequado do material sendo soldado.

É válido observar que todas essas patologias podem ser facilmente evitadas desde que ao se executar o projeto seja analisado o melhor processo a ser empregado, bem como elaborado um planejamento de execução do mesmo de forma coerente, para que dessa forma não ocorram a perda do material empregado.

3 METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Metal de base

Para a realização do estudo foram utilizadas 3 chapas finas de aço inoxidável duplex UNS S31803 cedidas pela empresa NCS Industrial Soluções em Manutenção e Fabricação localizada no município de João Neiva – ES.

As referidas chapas apresentavam-se em formato retangular com dimensões de 300x100x10mm como ilustrado pela Figura 4.

Figura 4 – Chapas utilizadas no estudo de caso.



Fonte: Dos autores

As chapas foram inicialmente chanfradas adotando-se o chanfro em “V” de 45° com aproximadamente 3mm baseando-se no modelo adotado por Locatelli e Ferreira (2017) em seus estudos.

Figura 5 – Modelo de chanfro utilizado para estudo



Fonte: LOCATELLI, FERREIRA (2017, p. 40)

As propriedades químicas, mecânicas e físicas do aço usado como metal de base utilizado são apresentados na Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6 respectivamente.

Tabela 4 – Propriedades químicas do aço inoxidável UNS S31803

Material	%C máx.	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%N	%Cu	Microestrutura
UNS S31803	0,03	1	2	22	5,5	3,2	0,18	-	Duplex

Fonte: SENATORE, FINZETTO, PEREA (2007, p. 176)

Tabela 5 – Propriedades mecânicas do aço inoxidável UNS S31803

Material	Resistência do escoamento MPA	Resistência à tração MPA	Alongamento mínimo %	Dureza Vickers	Microestrutura
UNS S31803	450	680-880	25	260	Duplex

Fonte: SENATORE, FINZETTO, PEREA (2007, p. 177)

Tabela 6 – Propriedades físicas do aço inoxidável UNS S31803

Material	Calor específico J/Kg°C			Condutibilidade térmica W/m°C		
	20°C	200°C	400°C	20°C	200°C	400°C
UNS S31803	480	530	490	14	17	20

Fonte: SENATORE, FINZETTO, PEREA (2007, p. 176)

3.1.2 Vareta para soldagem

Para o processo de soldagem foi utilizada como consumível a vareta inox duplex AWS ER2209 com diâmetro de 1,5mm. Segundo a American Welding Society (AWS) (2006) este consumível apresenta as características químicas apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Características químicas do consumível utilizado no estudo.

%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Mn	%Si	%P	%S	%N	%Cu
0,03	21,5-23,5	7,5-9,5	2,5-3,5	0,5-2,0	0,9	0,03	0,03	0,08-0,2	0,75

Fonte: AWS (2006, p. 4)

De acordo com a ASW (2006) as características deste consumível o tornam o mais indicado para solda no aço inox UNS S31803 devido a alta resistência à tração e corrosão. Roldão (2010) acrescenta que este tipo de consumível é indicado por produzir uma ZF mais bem equilibrada.

3.1.3 Eletrodo

Para a realização do processo foi utilizado o eletrodo de Tungstênio sendo a corrente compatível com o diâmetro e tipo do eletrodo, como estabelece a AWS (2006). O eletrodo utilizado em acordo com AWS AS 12-92 possui 2% de tório com ponta vermelha (AWS, 2006).

3.1.4 Fonte de soldagem

A soldagem das amostras para estudo foram realizadas na NCS Industrial Soluções em Manutenção e Fabricação, localizada no município de João Neiva – ES, utilizando-se a máquina Origo™ Tig 150 LiftArc (Figura 6), com as especificações definidas pela figura 7.

Figura 6 – Máquina utilizada no processo de soldagem



Fonte: ESAB (2006, p. 1)

Figura 7 - Especificações técnicas da máquina de solda usada no estudo

Origo™ TIG 150 LiftArc							
				IEC/EN 60974-1 EN 50199			
	8 A / 20 V - 150 A / 26 V						
		X	25%	35%	60%	100%	
	U _{ac}	I _z	150A	140A	110A	90A	
	58-75V	U _z	26V	25,5V	24,5V	23,5V	
	3 A / 10 V - 150 A / 16 V						
		X		35%	60%	100%	
	U _{ac}	I _z		150A	120A	95A	
	58-75V	U _z		16V	15V	14V	
		U _i 220/230V 50/60Hz		I _{Tmax} 36A	I _{Toff} 21A		
U _{pk} 11,5kV				IP 23C			

Fonte: ESAB (2006, p. 5)

3.2 MÉTODOS DE SOLDAGEM

3.2.1 Procedimentos de soldagem

Juntas com penetração total foram realizadas por meio do processo GTAW na empresa NCS Industrial Soluções em Manutenção e Fabricação. Para tal realização foram utilizados os parâmetros para corrente, voltagem e velocidade conforme apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros utilizados durante o processo de soldagem

Identificação	Corrente	Voltagem	Velocidade
HT 1	200A	24,5V	3,7mm/s
HT 2	200A	24,5V	1,2mm/s
HT 3	200A	24,5V	0,7mm/

Fonte: Dos autores

Vale ressaltar que os valores da velocidade são valores médios obtidos por meio da repetição, diversas vezes, do processo de soldagem que foram devidamente cronometrados para que se notasse em qual momento o soldador chegaria a um maior nível de precisão durante a realização da solda.

3.2.2 Energia de soldagem

A energia de soldagem (ou aporte térmico) foi obtida por meio da aplicação da Equação 2.

Com base na literatura utilizada como embasamento a energia de soldagem recomendada para o estudo é de 1,0 a 1,3 kJ/mm tendo por base o tipo de aço utilizado (PEREIRA, 2009).

O cálculo de energia de soldagem teve como base as correntes utilizadas na máquina de solda tendo voltagens diretamente proporcionais. A eficiência térmica adotada foi de 0,45 (45%). Segundo estudos realizados por Hernández *apud* Durand (2007) a eficiência energética para o tipo de processo utilizado fica entre 20% e 50%.

3.2.3 Análise microestrutural

A análise microestrutural foi realizada em laboratório do curso de Engenharia Mecânica das FAACZ. Anterior a análise microestrutural as amostras foram polidas e limpas por uma máquina Politriz (Figura 8) utilizando-se para tal processo as lixas #80, #220, #320, #400, #600, #1200 do tipo mesh.

Figura 8 – Máquina Politriz utilizada para polimento e limpeza de peças cortadas.



Fonte: Dos autores

Para a revelação da microestrutura foi aplicado ataque eletroquímico nas amostras utilizando-se ácido oxálico 10% como reativo conforme ilustra Figura 9.

Figura 9 – Ataque eletroquímico aplicado às peças em estudo.



Fonte: Dos autores

Logo após ataque as amostras foram lavadas em água corrente interrompendo a reação para posteriormente serem secas por meio de evaporação do álcool etílico por

meio de secador de ar aquecido com a finalidade de otimização do processo. Somente após esse procedimento foi realizada a análise microestrutural das amostras por meio de microscópio metalográfico (Figura 10) para quantificar e avaliar a microestrutura do corpo de prova. O equipamento é do tipo invertido trinocular TNM – 07T – PL.

Figura 10 – Microscópio metalográfico utilizado para análise microestrutural



Fonte: Dos autores

3.2.4 Ensaio de microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado no laboratório do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) adotando como norma a NBR NM188 (05/1999) da ABNT fazendo-se para tanto uso do durômetro Mitutoyo HM-100. As análises de microdureza das amostras foram realizadas partindo-se do centro do cordão para o metal de base. Este processo foi realizado através de Máquina de Dureza Vickers (Figura 11).

Figura 11 – Máquina de dureza Vickers



Fonte: Dos autores.

3.2.5 Ensaio de dureza

O ensaio de dureza foi realizado no laboratório do IFES adotando como norma a ABNT NBR NM ISO 6508.2008 fazendo-se uso do penetrador tipo cone de diamante Mutitoyo HR300 (Figura 12). Para este ensaio foi adotada a escala de dureza A que utiliza penetrador tipo cone de diamante.

Figura 12 – Penetrador utilizado para ensaio de dureza



Fonte: Dos autores

É válido mencionar que todos os equipamentos utilizados para a realização do estudo estavam devidamente calibrados.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base nas informações levantadas em estudo teórico e prático, o presente capítulo traz uma análise e breve discussão dos resultados encontrados, visando alcançar o efetivo aprendizado sobre o conteúdo tratado.

4.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

O aporte térmico sofrido pelas amostras durante o processo foi analisado por meio da Equação 2 mantendo-se a tensão e corrente constantes e variando-se apenas a velocidade aplicada pelo soldador durante a realização do processo em cada peça (Tabela 9).

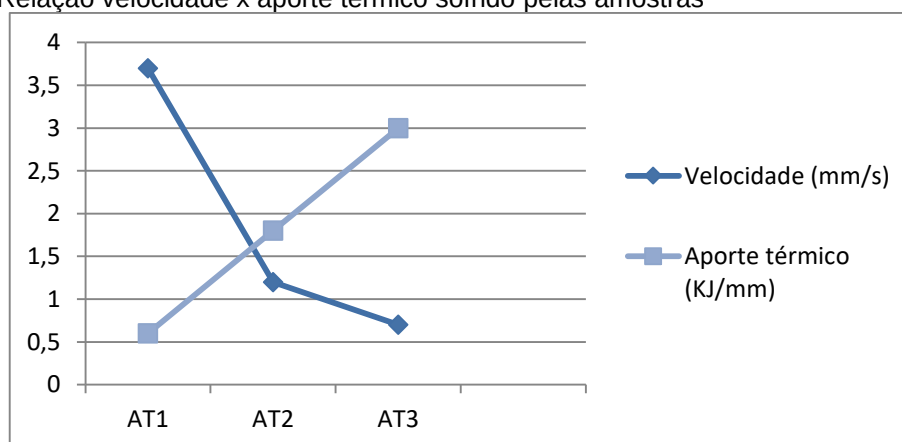
Tabela 9 – Aporte térmico identificado durante o processo de soldagem das amostras.

Aporte térmico (kJ/mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Rendimento	Velocidade (mm/s)
0,6	200	24,5	0,45	3,7
1,8	200	24,5	0,45	1,2
3,0	200	24,5	0,45	0,7

Fonte: Dos autores

Os dados evidenciados na Tabela 9 esclarecem a relação velocidade x aporte térmico, notando-se que quanto menor a velocidade, maior o aporte térmico sofrido pela amostra (Gráfico 1).

Gráfico 1 – Relação velocidade x aporte térmico sofrido pelas amostras

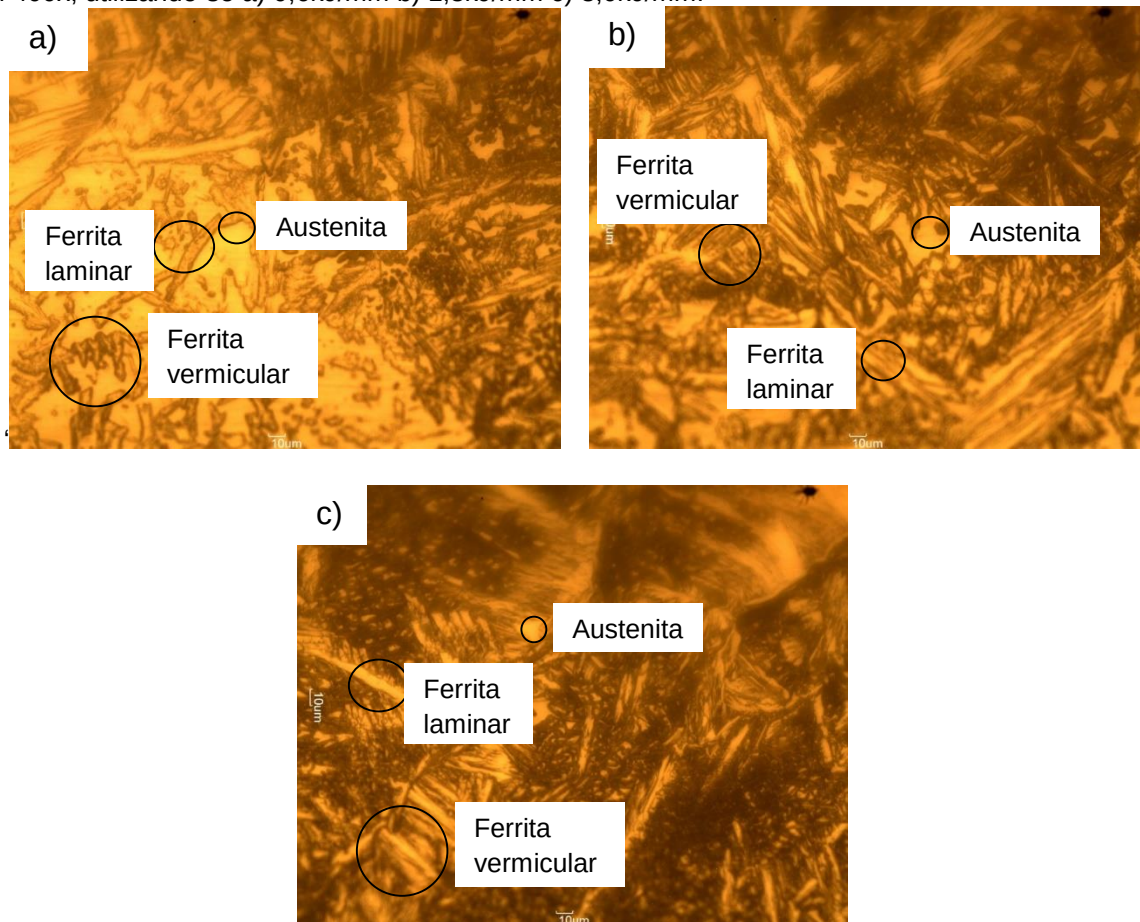


Fonte: Dos autores

Os aportes encontrados estão de acordo com a AWS (1998) que determina uma aplicação mínima de energia de 0,5 kJ/mm para o aço UNS S31803 garantindo um significativo percentual de austenita no metal de solda.

A Figura 13 ilustra as microestruturas dos metais de solda para as energias de soldagem empregadas.

Figura 13 – Microestruturas dos metais de solda obtidas a partir das energias de soldagem, ampliadas em 400x, utilizando-se a) 0,6kJ/mm b) 1,8kJ/mm c) 3,0kJ/mm.



Fonte: Dos autores.

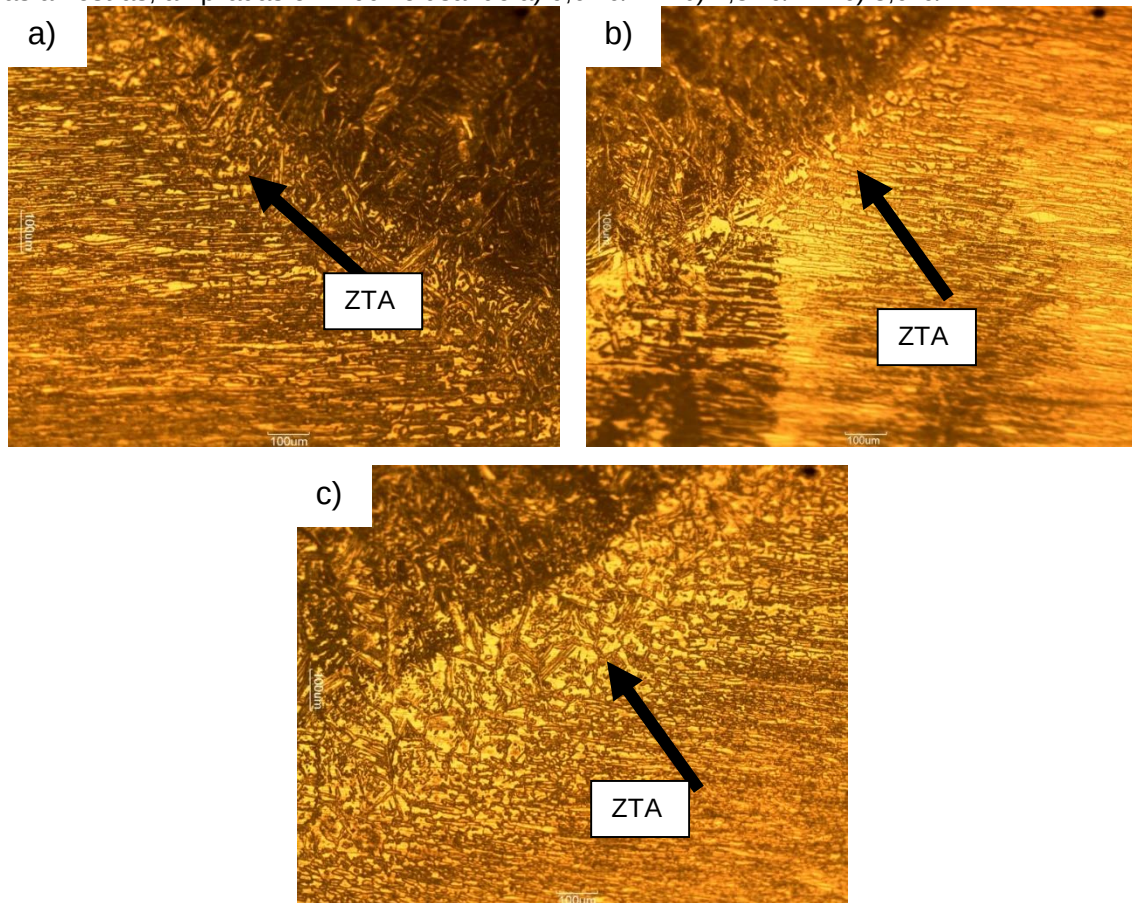
Como já elucidado anteriormente nesta produção, o metal de base é morfologicamente composto por austenita e ferrita. Após aplicação dos respectivos aportes observa-se que as peças apresentam austenita e ferrita do tipo vermicular e do tipo laminar.

A Figura 13 deixa evidente que em cada amostra a microestrutura varia apresentando uma menor área de austenita e maior quantidade de ferrita laminar. De acordo com Assumpção (2006) o aporte sofrido pelos ciclos térmicos envolvidos no processo de

soldagem são responsáveis pelas alterações microestruturais do metal de base, logo, quanto maior o aporte, maior as alterações a serem apresentadas.

Brooks, Williams e Thompson *apud* Locatelli e Ferreira (2017) ponderam que a presença da ferrita vermicular é comum no tipo de aço em estudo. Já a ferrita laminar surge devido ao procedimento de soldagem (LOCATELLI, FERRIRA, 2017). Resultados semelhantes foram observados por estudos realizados por Souza (2017). A Figura 14 evidencia as microestruturas das ZTA obtidas para os diferentes aportes sofridos, as imagens foram ampliadas em 100x.

Figura 14 – Microestruturas das ZTA conquistadas a partir dos diferentes aportes térmicos sofridos pelas amostras, ampliadas em 100x e usando a) 0,6 kJ/mm b) 1,8 kJ/mm c) 3,0kJ/mm.



Fonte: Dos autores.

Morfologicamente nota-se que a fase ferrita apresenta-se sobre a matriz austenita. Na Figura 14a nota-se que a ZTA é uma região com microestrutura consideravelmente alterada havendo desse modo aumento do tamanho de grãos. De acordo com Souza *et al.* (2014) devido ao processo de soldagem a ZTA sofre um desbalanceamento entre as fases austenita e ferrita onde a primeira decresce e muda morfologicamente.

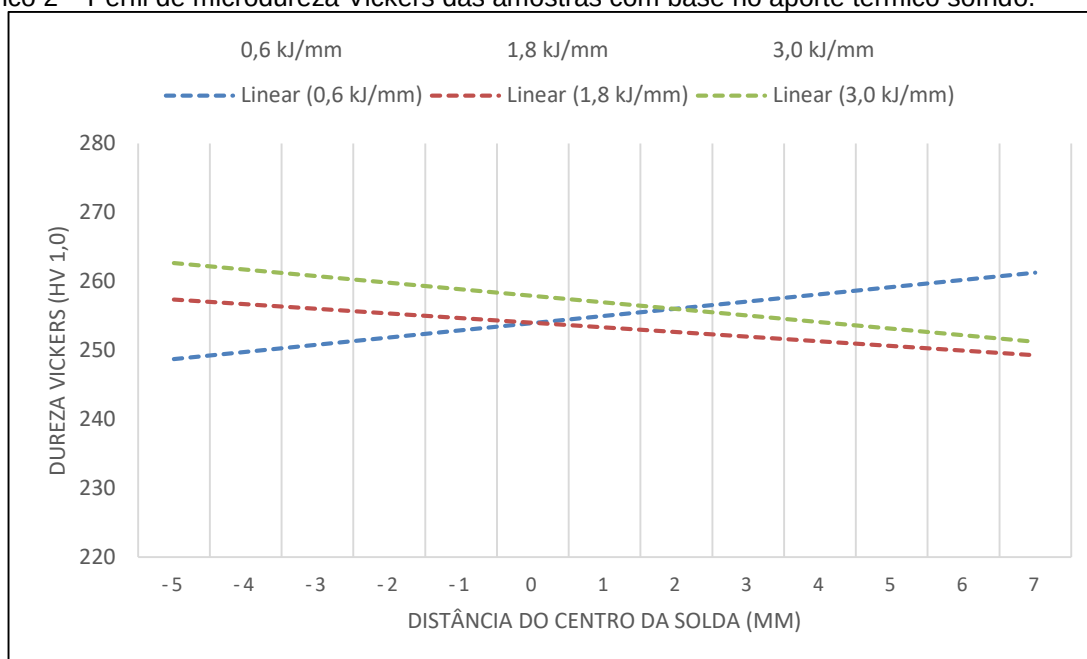
Já nas Figuras 14b e 14c observa-se que este aumento de grãos é ainda mais evidente dado o aumento de energia, como pondera Fonseca, Pinheiro e Silva (2016) em estudos realizados, onde afirmam que quanto maior o aporte térmico, menores as taxas de resfriamento proporcionando maior formação de ferrita. Resultados semelhantes foram encontrados por Modenesi *apud* Videira (2016) que notou a instabilidade da austenita em aço duplex tornando-se este ferrítico ao ser submetido a elevadas temperaturas.

4.2 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

Na realização de ensaio de microdureza das amostras em estudo foram obtidos valores por meio de médias das medições para melhor avaliação dos resultados encontrados.

Partindo-se dos valores obtidos pelo ensaio foi possível confeccionar o Gráfico 2, observando-se a mudança de cada perfil com base nos aportes sofridos.

Gráfico 2 – Perfil de microdureza Vickers das amostras com base no aporte térmico sofrido.



Fonte: dos autores.

Com base no Gráfico 2 nota-se que as amostras mostram comportamento adverso. As amostras que sofreram aporte térmico menor tiveram picos abruptos de dureza nos pontos Y = -4 e 1mm e queda também abrupta no ponto Y = -2mm o que pode ser

explicado devido ao distanciamento do centro da solda, ou seja, é um aumento ocasionado pelo processo de fusão. As amostras submetidas a aporte médio se mostraram bem instáveis com aumentos e quedas de dureza durante todo o processo com destaque para o aumento sofrido no ponto Y = -4mm e a queda no ponto Y = -3mm por terem sido mudanças mais significativas. Já as amostras submetidas a aporte térmico alto se mostraram mais proporcionais, pois os aumentos e quedas de dureza não tiveram um comportamento tão abrupto quanto nas amostras sujeitas a aportes baixo e médio.

Esta mudança microestrutural ocorrido é verificada de acordo com o tratamento térmico recebido (LOUREIRO, 2010).

Roldão *apud* Loureiro (2010) esclarece que a variação do aporte térmico durante o processo de soldagem influencia na microdureza do aço, mas não altera de forma considerável a resistência a tração do material.

4.3 ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL

As medições de dureza Rockwell (HRA) nas amostras estão apresentadas nas Tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10 – Medições de dureza HRA para aporte térmico de 0,6 kJ/mm

Metal de base		Linha de topo		Linha de centro	
Ponto	HRA	Ponto	HRA	Ponto	HRA
1	49,1	-4	58,4	-4	56,7
2	55,1	-3	58,1	-3	56,7
3	56,9	-2	58,1	-2	57,0
		-1	54,6	-1	54,7
		0	49,6	0	45,6
		1	54,5	1	55,3
		2	56,9	2	56,6
		3	56,2	3	51,4
		4	56,6	4	55,1

Fonte: Dos autores

Tabela 11 – Medições de dureza HRA para aporte térmico de 1,8 kJ/mm

Metal de base		Linha de topo		Linha de centro	
Ponto	HRA	Ponto	HRA	Ponto	HRA
1	55,6	-4	60,9	-4	59,7
2	57,7	-3	59,1	-3	59,9
3	56,3	-2	58,8	-2	60,6
		-1	53,4	-1	60,5
		0	53,2	0	58,5
		1	60,4	1	60,2
		2	55,1	2	60,7
		3	51,9	3	61,0
		4	43,6	4	60,3

Fonte: Dos autores

Tabela 12 – Medições de dureza HRA para aporte térmico de 3,0kJ/mm

Metal de base		Linha de topo		Linha de centro	
Ponto	HRA	Ponto	HRA	Ponto	HRA
1	58,0	-4	56,1	-4	59,2
2	58,3	-3	58,1	-3	58,8
3	59,5	-2	63,0	-2	59,6
		-1	60,1	-1	60,0
		0	60,6	0	59,3
		1	60,6	1	59,8
		2	61,1	2	59,9
		3	59,9	3	59,6
		4	62,0	4	58,9

Fonte: Dos autores

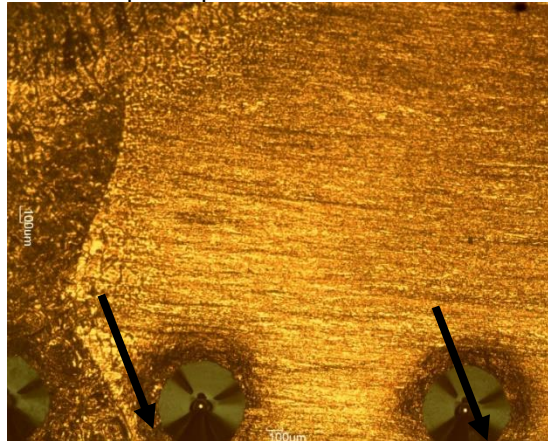
Observando as Tabelas 10, 11 e 12 nota-se que o valor de dureza para o metal base foi de 56,3 HRA. Segundo Fonseca (2015) a dureza do metal base deve ser de 260HV ou 62,7HRA. A diferença de valores pode ser justificada pela diferença das dimensões dos corpos de prova utilizados no presente estudo.

Nas linhas de topo e de centro nota-se um leve aumento nos valores de dureza em relação ao metal base, podendo ser justificado devido ao aquecimento da área

durante processo de soldagem quando, segundo Videira (2016), há formação de ferrita.

A Figura 15 apresenta uma micrografia da impressão deixada no ensaio de dureza Rockwell.

Figura 15 – Impressão deixada no corpo de prova durante ensaio de dureza Rockwell



Fonte: Dos autores

Embasado nos dados alavancados nota-se que os valores de dureza Rockwell sofrem grande variação de acordo com a proximidade da área de solda, não deixando de identificar também que quanto maior o aporte maior a dureza Rockwell na linha de topo e linha de centro, enquanto que no metal-base a variação é mínima.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como propósito realizar uma análise do efeito da variação da energia de soldagem na microestrutura e dureza do aço inoxidável duplex UNS S 31803, utilizando-se para tanto ensaios de dureza, microdureza e metalográfico.

Tendo por base todo material analisado durante a realização do presente estudo é possível concluir que a microestrutura do aço em análise possui maior quantidade de ferrita laminar à medida que há aumento de aporte térmico.

No ensaio de microdureza Vickers os valores de microdureza tendem a diminuir à medida que se aumenta a energia de soldagem empregada. No ensaio de dureza Rockwell nota-se que a média de dureza da linha de topo é de 57,1HRA e para a linha de centro é de 58,0HRA, ou seja, muito próximo para o valor encontrado para o metal base que foi de 56,3HRA.

É relevante mencionar que o uso de dureza Vickers e Dureza Rockwell no estudo foi de fundamental importância uma vez que cada um permite uma análise diferente no que tange à dureza do material. Mesmo tendo a função de analisar a dureza no primeiro ensaio realiza-se uma análise de toda área afetada próxima a ZF, em contrapartida o segundo ensaio permite uma análise mais pontual da área na qual se aplica à perfuração com durômetro por meio da profundidade dessa.

Com a realização do estudo apresentado evidencia-se que os aportes encontrados estão ideais, estando de acordo com a norma AWS que define aporte mínimo de 0,5kJ/mm. Dentre os três valores encontrados o primeiro e segundo são os melhores por apresentarem um melhor balanceamento entre ferrita e austenita, observando-se que o aporte de 3kJ/mm confere à peça uma maior concentração de austenita.

REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). **Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods: AWS A5.9/A5.9M**. Miami: AWS, 2006.

_____. **Welding handbook**. 8 ed. Miami: AWS, 1998. v. 4.

ASSUMPÇÃO, Gueder Alves. **Estudo da técnica dupla camada na soldagem do aço ABNT 1045**. 2006. 54f. Manuscrito (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2006. Disponível em: http://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2006-1_queder_alves_assumpcao.pdf. Acesso em 9 jul. 2018.

ATAMERT, S.; KING, J. E. **Super duplex stainless steel: parte I: heat affected zone microstructure**. Materials Science and Technology, 1992.

BRANCHINI, Odécio J. G. **Garantia de qualidade na soldagem**. In: WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de (coords.). **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

BRANDI, Sérgio D. **Classificação dos processos de soldagem**. In: WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de (coords.). **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

_____. **Processo MIG/MAG**. In: WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de (coords.). **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

_____. **Processo TIG**. In: WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de (coords.). **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

CARLOS, João; CARRITÁ, Pedro Henrique Gomes; SOUZA, Tainá Itacy Zanin de. **Trabalho de solidificação: soldagem**. Disponível em: <http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5009972/LOM3045/Soldagem-texto.pdf>. Acesso em 09 jul. 2018.

CASTRO, Rodrigo Martins de. **Efeito do aporte térmico na soldagem de reparos embutidos em minerodutos**. 2011, 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Universidade de Ouro Preto. Escola de Minas. Rede Temática em Engenharia de Materiais, 2011. Disponível em: http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/6464/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_EfeitoAporteT%C3%A9rmico.pdf. Acesso em 01 out. 2018.

CASTRO, R.; CADENET, J. J. **Welding Metallurgy of Stainless and Heat Resisting Steel**. Cambridge University Press, 1975.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7ed. Ampl. e Rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2015.

COUTINHO, C. Bottrel. **Materiais metálicos para engenharia**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1992.

DURAND, Richard Zacarias Sanz. **Avaliação da microestrutura e propriedades mecânicas da soldagem circunferencial do aço API 5L X80 por processo de soldagem semi-automáticos com proteção gasosa**. 2007, 143f. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais e Metalurgia) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=10959@1>. Acesso em 10 ago. 2018.

ESAB. **Origo™ TIG 150 LiftArc, Origo™ TIG 200 LiftArc**: fonte de energia para soldagem TIG e com eletrodos revestidos. São Paulo, 2006. Disponível em <http://www3.esab.com.br/literatura/pdf/02080009_rev5_OrigoTi150-200LiftArc_pt_es.pdf>. Acesso em 10 ago. 2018.

FONSECA, Camila Soares. **Influência do aporte térmico sobre a microestrutura e susceptibilidade a formação de fase sigma no aço inoxidável duplex SAF2205**. 2015, 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <http://www.posmat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/120/2017/08/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Camila_Fonseca.pdf>. Acesso em 10 ago. 2018.

FONSECA, Camila Soares; PINHEIRO, Ivete Peixoto; SILVA, Sidney Nicodemos da. Influência do aporte térmico sobre a morfologia da austenita e na quantidade das fases em chapas soldadas de aço inoxidável duplex SAF2205. **Rev. Matéria**. 2016, p. 227-234. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762016000100021&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em 09 jul. 2018.

FONSECA, Marcelo Alves *et. al.* **Efeito do insumo de calor na microestrutura da solda do aço NTU-SAR50 pelo processo a arco submerso**. 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/237594880_EFEITO_DO_INSUMO_DE_CALOR_NA_MICROESTRUTURA_DA_SOLDA_DO_ACO_NTU-SAR50_PEL_O_PROCESSO_A_ARCO_SUBMERSO>. Acesso em 09 jul. 2018.

INTERNATIONAL MOLYBDENUM ASSOCIATION – IMOA. **Practical Guidelines for the fabrication of duplex stainless steels**. 2ed. Londres: IMOA, 2009.

LOCATELLI, André Galimberti; FERREIRA, Lucas Vinícius de Barros. **Efeito da energia de soldagem na microestrutura e propriedades mecânicas nas juntas soldadas pelo processo TIG do aço inoxidável austenítico AISI 304**. 2017.67f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica) – Faculdades Integradas de Aracruz. Aracruz, 2017.

LOUREIRO, Jessica Pisano. **Caracterização do aço inoxidável duplex UNS S31803 pela técnica não destrutiva de correntes parasitas pulsadas**. 201. 10f. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010. Disponível em:
<<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10003511.pdf>>. Acesso em 9 jul. 2019.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos aços inoxidáveis**. São Paulo: Ed. SENAI-SP, 2001.

PEREIRA, Patrícia Apicelo de Souza. **Efeito da energia de soldagem na microestrutura de um aço inoxidável duplex e super duplex**. 2009, 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia Laboratório de Materiais Avançados. Goytacazes, 2009. Disponível em:
<<http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Mestrado.pdf>>. Acesso em 09 jul. 2018.

ROLDÃO, Antonio Marcos Borba. **Estudo do efeito do aporte térmico nas propriedades mecânicas e microestruturais do aço inoxidável duplex UNS S 31803 em chapa grossa, soldado pelo processo GMAW**. 2010, 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais, 2010. Disponível em:
<http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&o_obra=190499>. Acesso em 09 jul. 2018.

SENATORE, Marcelo; FINZETTO, Leandro; PEREA, Eduardo. Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis duplex e os inoxidáveis AISI 304/316L. **REM: R. Esc.** Minas, 2007. 175-181p. Disponível em:
<<http://www.scielo.br/pdf/rem/v60n1/v60n1a27.pdf>>. Acesso em 09 jul. 2018.

SOLOMON, H. D.; DEVINE, T. M. **A tale of two fases**. Conference Duplex Stainless Steel's82-Proceedings, St. Louis, Estados Unidos, 1982

SOUZA, Mauro Carlos Lopes *et al.* Estudo microestrutural de uma junta soldada do aço inoxidável duplex SAF 2507 pelo processo TIG. **Cadernos UniFOA**. Abril, 2014. Disponível em:
<<http://revistas.unifoa.edu.br/index.php/cadernos/article/view/149/148>>. Acesso em 9 jul 2019.

SOUZA, Marcel Freitas de. **Estudo das propriedades mecânicas e tensões residuais de juntas soldadas de aço AISI 316 L**. 2017. 188f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense. Niterói/RJ, 2017. Disponível em:
<<http://www.mec.uff.br/pdftheses/MarcelFreitasdeSouza2017.pdf>>. Acesso em 09 jul. 2018.

VIDEIRA, Arthur Moraes e. **Influência do aporte térmico da soldagem GTAW no balanço de fases ferrita/austenita do aço inoxidável duplex UNS S32205**. 2016, 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/136319>>. Acesso em 09 jul. 2018.

TANIGUCHI, Célio. **Transferência de calor na soldagem**. In: WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de (coords.). **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

WELDINGIS. **GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) or TIG Welding Machine Process Is**. 2017. Disponível em: <<https://www.weldingis.com/gtaw-welding/>>. Acesso em 09 jul. 2018.

ANEXO I – NBR's NO CAMPO DE SOLDAGEM

NBR	DESCRIÇÃO
5874/77	Terminologia da soldagem elétrica
5883/82	Solda branda
6634/87	Solda branda em fio com núcleo de resina (para aplicação eletrônica)
7165/82	Símbolos gráficos de solda para construção naval
7239/82	Tipos de chanfros de solda manual para construção naval
7859/83	Máquinas elétricas para soldagem a arco. Terminologia
8420/84	Solda de construção naval. Identificação de descontinuidades radiográficas
8762/85	Cabos flexíveis com cobertura para máquinas de soldar a arco
8878/85	Solda manual e semiautomática para estrutura de embarcações. Qualificação de soldadores.
9111/85	Varetas e arames de ligas de alumínio para soldagem e brasagem, de aplicação aeronáutica
9360/86	Inspeção radiográfica em soldas na estrutura do casco de embarcações
9378/86	Equipamento elétrico para solda a arco. Fontes de energia de corrente constante e fontes de energia de tensão constante (geradores, transformadores e dispositivos auxiliares)
9540/86	Requisitos gerais para um programa de qualificação de soldadores e operadores de soldagem em nível aeroespacial.