

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM PROJETO E PROCESSOS DE  
FABRICAÇÃO

Área de concentração: Projeto e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA E A FADIGA DE  
AÇO AISI 304 SOLDADO PELO PROCESSO LASER

Lucas Ghellioni Borges

Passo Fundo

2024



**Lucas Ghellioni Borges**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA E A FADIGA DE  
AÇO AISI 304 SOLDADO PELO PROCESSO LASER**

Orientador: Prof. Dr. William Haupt

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo  
2024



Lucas Ghellioni Borges

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA E A FADIGA DE  
AÇO AISI 304 SOLDADO PELO PROCESSO LASER**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 29 de fevereiro de 2024.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor William Haupt  
Orientador

Professor Doutor Mário Wolfart Jr  
Instituto Federal Catarinense IFC

Professor Doutor Francisco Briones Castillo  
Pontificia Universidad Catolica de Valparaiso PUCV

Professor Doutor Charles Leonardo Israel  
Universidade de Passo Fundo PPGPPF

*Dedico este trabalho a minha família,  
principalmente aos meus pais Marco e  
Claudimar, meus irmãos Adile e Vitor,  
minha namorada Ana Carolina e minha  
nona Lourdes (in memorian).*

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço primeiramente a Deus, pela vida que me deu e pelas oportunidades a mim concedidas durante todo meu desenvolvimento acadêmico, bem como profissional.*

*Aos meus pais, Marco e Claudimar, que incentivaram e apoiaram sempre para que todos seus filhos pudessem estudar, colaborando diretamente para o sucesso de todos nas suas vidas.*

*À minha irmã Adile que todas vezes que solicitada para auxiliar no desenvolvimento do trabalho, colaborou de forma direta e assertiva. Ao meu cunhado Alessandro e meu irmão Vitor, que sempre incentivaram também a realização do mestrado para que pudesse potencializar a carreira profissional e acadêmica.*

*Aos meus sobrinhos e afilhados, Davi e Maria Luiza, que inspiram toda a família a ser um pouco melhor a cada dia, com suas essências de criança.*

*À minha namorada, Ana Carolina, que desde que chegou em minha vida vem me incentivando a cada dia para realização do mestrado, assim como todo o auxílio prestado em Passo Fundo durante todas as aulas e orientações.*

*À Universidade de Passo Fundo (UPF), por meio do Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação, pela confiança e pelos recursos prestados no desenvolvimento da ciência, bem como também pelo auxílio financeiro através da Bolsa Institucional.*

*À Stara Indústria de Implementos Agrícolas S/A pela confiança depositada no trabalho, bem como todo auxílio com material e tempo prestado, fazendo com que o sucesso do trabalho aumentasse consideravelmente.*

*Às empresas Powermig (Caxias do Sul – RS) e H Soldas (Blumenau – SC) por todo auxílio prestado com o desenvolvimento de ensaios de soldagem com suas fontes de soldagem à laser.*

*Ao professor orientador Dr. William Haupt, pelas orientações, auxílios, desenvolvimentos e considerações com o único objetivo de potencializar o sucesso do trabalho realizado, agradeço também pelo profissionalismo exercido sempre, em todas as tomadas de decisões.*

*Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para o sucesso deste trabalho.*

*“O único lugar onde o sucesso vem antes  
do trabalho é no dicionário.”*

*Albert Einstein*

## RESUMO

Os processos de fabricação estão inovando juntamente com os produtos e tecnologias que estão sendo entregues pelos fabricantes de máquinas e equipamentos. Diante disso, o desafio atual é desenvolver processos de fabricação que atendam os requisitos mecânicos e também possuam alta produtividade e proporcionem um bom acabamento aos produtos que estão sendo aplicados. Os processos de fabricação por soldagem estão separados em processos de fabricação convencionais e não convencionais, por isso, este trabalho busca avaliar a influência da geometria da junta soldada em aço inoxidável AISI 304 quando submetida ao processo de soldagem a laser, este considerado um processo não convencional de fabricação. Os principais objetivos são avaliar a influência da configuração da junta quanto as suas propriedades mecânicas, assim como a sua resistência a fadiga quando sujeita a esforços críticos. Para desenvolvimento das amostras foram utilizados chapas de aço inoxidável AISI 304 com 3 milímetros de espessura e potências de soldagem de 900 a 1200 Watts. Para as condições ensaiadas, conclui-se que as juntas soldadas a laser autógena - sem abertura de raiz e adição de metal - apresentaram maior resistência mecânica, assim como uma resistência a fadiga de 42296 ciclos, quando submetida a cargas de 70% da tensão máxima, assim como também um menor desvio padrão dos valores de microdurezas. A condição com abertura de raiz e metal de adição apresentou resistência de 27201 ciclos quando submetidas as mesmas condições anteriores, assim como também apresentaram valores inferiores nos demais ensaios mecânicos.

Palavras-chave: “AISI 304”; “fadiga”; “aço inoxidável” ; “processo não convencional”; “influência”.

## **ABSTRACT**

Manufacturing processes are innovating alongside the products and technologies being delivered by machinery and equipment manufacturers. Given this, the current challenge is to develop manufacturing processes that meet mechanical requirements and also have high productivity and provide a good finish to the products being applied. Welding manufacturing processes are separated into conventional and non-conventional manufacturing processes, therefore, this work seeks to evaluate the influence of the geometry of the welded joint in AISI 304 stainless steel when subjected to the laser welding process, which is considered a non-standard process. conventional manufacturing. The main objectives are to evaluate the influence of the joint configuration on its mechanical properties, as well as its resistance to fatigue when subjected to critical efforts. To develop the samples, AISI 304 stainless steel sheets were used, 3 millimeters thick and with welding powers of 900 to 1200 Watts. For the tested conditions, it is concluded that the autogenous laser welded joints - without root opening and metal addition - presented greater mechanical resistance, as well as a fatigue resistance of 42296 cycles, when subjected to loads of 70% of the maximum tension , as well as a lower standard deviation of microhardness values. The condition with root opening and filler metal presented resistance of 27201 cycles when subjected to the same previous conditions, as well as lower values in other mechanical tests.

Keywords: “AISI 304”; “fatigue”; “stainless steel”; “unconventional process”; “influence”.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Efeitos de elementos de liga na curva de polarização. ....	21
Figura 2 - Aplicações de aços inoxidáveis austeníticos. ....	24
Figura 3- Princípio de funcionamento do LASER. ....	26
Figura 4 - Esquema de funcionamento da solda laser. ....	26
Figura 5 - Micrografia de juntas soldadas de aço inoxidável AISI 316. ....	29
Figura 6 - Fluxograma do planejamento do trabalho. ....	33
Figura 7 - Esboço da configuração da junta e processo de soldagem. ....	36
Figura 8 - Corpo de prova de tração soldado (dimensões em mm). ....	38
Figura 9 - Corpo de prova para ensaio de fadiga (dimensões em mm). ....	40
Figura 10 - Macrografia de amostradas soldadas preliminarmente. ....	41
Figura 11 - Micrografia metal de base AISI 304. ....	42
Figura 12 - Corpo de prova soldado. ....	44
Figura 13 - Corpo de prova soldado com amostras de ensaios. ....	44
Figura 14 – Macrografia – Condição A. ....	45
Figura 15 - Macrografia - Condição B. ....	45
Figura 16 - Macrografia - Condição C. ....	46
Figura 17 - Análise micrográfica condição A. ....	47
Figura 18 - Análise micrográfica condição B. ....	47
Figura 19 - Análise micrográfica condição C. ....	48
Figura 20 - Gráfico de Microdurezas - Face Cordão de Solda. ....	49
Figura 21 - Gráfico de Microdurezas - Raiz Cordão de Solda. ....	49
Figura 22 - Resistência a fadiga. ....	54
Figura 23 – Corpo de prova com ruptura – Condição A. ....	55
Figura 24 – Local de propagação de trinca – Condição A. ....	56
Figura 25 - Região de ruptura da fratura – Condição A. ....	56
Figura 26 – Corpo de prova com ruptura – Condição B. ....	57
Figura 27 - Região de início da fratura - Condição B. ....	58
Figura 28 - Região de ruptura da fratura - Condição B. ....	58
Figura 29 - Corpo de prova com ruptura - Condição C. ....	59
Figura 30 - Região de início da fratura (Condição C). ....	59
Figura 31 - Região de ruptura da fratura (Condição C). ....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Característica e aplicações de aços inoxidáveis.....	22
Tabela 2 - Composição Química AISI 304. ....	24
Tabela 3 - Resistência Mecânica AISI 304. ....	25
Tabela 4 - Condições de realização das soldagens. ....	35
Tabela 5 – Parâmetros de soldagens utilizados em cada condição.....	36
Tabela 6 - Composição química do material de base. ....	43
Tabela 7 - Dados dos ensaios de tração. ....	50
Tabela 8 - Ensaio de Tração - Desvio Padrão das Amostras.....	51
Tabela 9 - Teste Tukey - Limite de Resistência ao Escoamento (MPa).....	52
Tabela 10 - Teste Tukey - Limite de Resistência ao Escoamento (MPa).....	53
Tabela 11 - Dados Ensaio de Fadiga - Condições Soldadas.....	54
Tabela 12 - Teste Tukey - Ensaio de Fadiga. ....	55
Tabela 13 - Comparativo das resistências mecânicas entre as condições. ....	62

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 - Ensaio de tração condição A (amostra A3).....	51
Gráfico 2 - Ensaio de tração condição B (amostra B3).....	51
Gráfico 3 - Ensaio de tração condição C (amostra C3).....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIMAQ	Associação Brasileira de Máquinas e Equipamentos
AISI	American Iron and Steel Institute
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission os Radiation
AWS	American Welding Society
ZAC	Zona termicamente afetada pelo calor
GMAW	Gas Metal Active Welding
LBW	Laser Beam Welding
SAE	Society of Automotiv Engineers
UPF	Universidade de Passo Fundo
ASTM	American Society for Testing and Materials

## LISTA DE SÍMBOLOS

W Watt

MPa Megapascal

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1	Objetivos	19
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	19
1.1.2	<i>Objetivo específicos</i>	19
<b>2</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>21</b>
2.1	Aços inoxidáveis	21
2.1.1	<i>Aços Inoxidáveis Austeníticos</i>	23
2.2	Soldagem a laser	25
2.3	Soldagem a Laser de Aços Inoxidáveis	28
2.4	Resistência a fadiga de juntas soldadas a laser	29
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>32</b>
3.1	Material de base	34
3.2	Consumíveis de soldagem	34
3.3	Soldagem dos corpos de prova	35
3.4	Procedimento de soldagem	35
3.5	Caracterização metalúrgica	36
3.5.1	<b>Macroscopia</b>	<b>36</b>
3.5.2	<b>Microscopia</b>	<b>37</b>
3.5.3	<b>Fractografias</b>	<b>38</b>
3.6	Caracterização mecânica	38
3.6.1	<b>Ensaio de tração</b>	<b>38</b>
3.6.2	<b>Ensaio de microdureza Vickers</b>	<b>39</b>
3.6.3	<b>Ensaio de fadiga</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>41</b>
4.1	Resultados preliminares	41
4.2	Análise química do material de base	42
4.3	Corpos de provas	43
4.4	Metalografia	44
4.4.1	<b>Análise macrográfica</b>	<b>45</b>
4.4.2	<b>Análise micrográfica</b>	<b>46</b>
4.5	Microdureza Vickers	48
4.6	Ensaio de tração	50
4.7	Ensaio de fadiga	53
4.8	Fractografias	55

	17
4.9 Discussão dos Resultados .....	60
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com os dados da Abimaq (2023), em relação à 2021 as vendas internas no Brasil de máquinas agrícolas superaram os R\$ 91 bilhões de reais, um acréscimo de 2% em relação ao indicador passado<sup>1</sup>. O desenvolvimento da indústria metalmeccânica representa também a evolução dos processos de fabricação de uma região e/ou país. A influência do desenvolvimento do setor agrícola, especificamente na região norte do estado do Rio Grande do Sul, está relacionada diretamente com a evolução dos seus processos também, visto que a medida que a tecnologia – cada vez mais presente nos implementos agrícolas – avança, os processos de fabricação destes deverão acompanhar. A evolução das máquinas e implementos agrícolas no século XIX possibilitou um ganho imensurável na produtividade das lavouras, reformulando totalmente as técnicas de produção e aumentando assim a competitividade no mercado de fabricação de implementos agrícolas (origens, evolução e tendências da indústria de máquinas agrícolas).

A utilização de aços na fabricação de implementos agrícolas é muito comum, principalmente os aços carbonos comuns, como SAE 1020, SAE 1045, A36, entre outros. O desenvolvimento de aços com características e propriedades que atendam a necessidade do campo está em uma crescente elevada na fabricação de implementos e também na armazenagem de grãos<sup>2</sup>.

Na indústria os aços inoxidáveis são muito aplicados devido a sua grande capacidade de resistência a agentes corrosivos e por isso os aços inoxidáveis AISI 304 são um dos que mais são utilizados na indústria de fabricação de implementos agrícolas. A série 300 dos aços inoxidáveis austeníticos são considerados aços não magnéticos com estrutura cúbica de face centrada, sendo uma liga entre Ferro, Cromo e Níquel<sup>3</sup>. A soldagem de aços inoxidáveis deve ser realizada em uma condição controlada, principalmente devido ao seu acabamento superficial desejado, bem como também a garantia da qualidade da junta soldada. O processo de fabricação de soldagem a laser quando aplicado a solda de aços inoxidáveis garante uma penetração e velocidade de soldagem superior quando comparada a outros processos de fabricação convencionais.

---

<sup>1</sup> Dados obtidos em: <https://www.canalrural.com.br/noticias/economia/venda-de-maquinas-agricolas-bate-recorde-no-brasil-em-2022/>. Acesso em: maio 2023.

<sup>2</sup> Dados obtidos em: <https://www.arandanet.com.br/revista/ccm/noticia/3067-Aplicacao-do-aco-inox-no-agronegocio-e-tema-de-estudo.html>. Acesso em: maio 2023.

<sup>3</sup> Dados obtidos em: <http://guides.com.br/home/wp-content/uploads/2011/12/inonx-apost-tec.pdf>. Acesso em: maio 2023.

Existem diversos fatores que podem influenciar na resistência mecânica da junta solda, de acordo com Geng et. al. (2019), a distância focal e aumento da temperatura na região da junta soldada pode influenciar na alteração da microestrutura, bem como na resistência mecânica da junta soldada de aços inoxidáveis. Palanisamy, Rajendran & Kumar (2023), desenvolveram um estudo para avaliar a influência do ângulo de inclinação do laser nas propriedades mecânicas de uma junta soldada em aço inoxidável. Deste modo, este trabalho visa investigar uma condição diferente, onde a influência da configuração de uma junta soldada em aço inoxidável quando sujeita a um GAP, também conhecido como folga ou abertura entre as chapas, com e sem adição de metal de soldagem aplicando o *laser welding* (soldagem à laser), desta forma validando a configuração da junta quando sujeita a esforços mecânicos para que seja implementada nos projetos de implementos agrícolas, visto que estas variações da configuração da junta e do processo de fabricação podem influenciar diretamente na resistência mecânica da mesma. A resistência mecânica de uma junta soldada, principalmente a fadiga, pode ser diretamente ligado a geometria da junta soldada, considerando também se houver um entalhe na junta que possa ser um concentrador de tensões para início da falha que leve a fratura (Odermatt, et al., 2021).

## **1.1 Objetivos**

### *1.1.1 Objetivo geral*

Avaliação das variáveis das juntas soldadas e do processo de fabricação por soldagem à laser, buscando determinar a influência destes na resistência mecânica e vida em fadiga das uniões soldadas.

### *1.1.2 Objetivo específicos*

- Determinar possíveis variações de geometrias de juntas e do processo de fabricação a laser;
- Analisar as diferenças da resistência mecânica e microestruturais das juntas soldadas;
- Avaliar a microdureza considerando a influência da adição de metal ou não na junta soldada;

- Comparar a resistência a fadiga das diferentes juntas soldadas.

## 2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

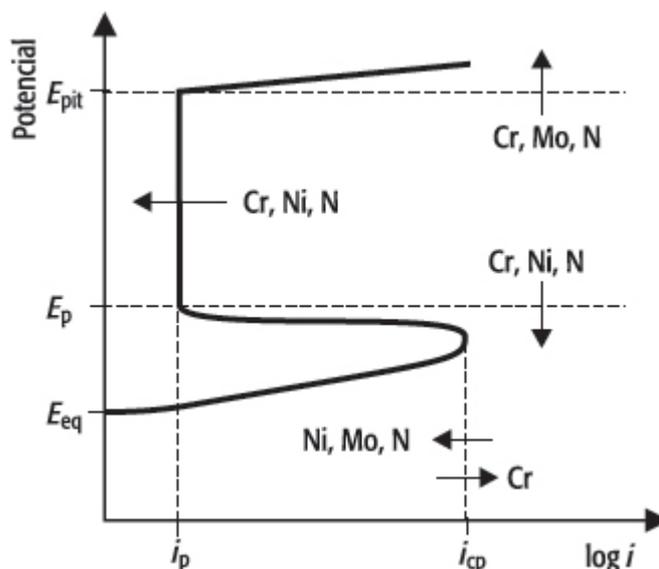
### 2.1 Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são aços utilizados em construções mecânicas e também muito utilizados na indústria civil (construções de edifícios). A principal aplicação de aços inoxidáveis em estruturas metálicas é em projetos que necessitam uma resistência a corrosão maior que a dos aços carbonos normais.

De acordo com Costa (2021) nem todos os materiais são completamente inoxidáveis, principalmente na seleção incorreta deste material. Aços carbonos comuns podem apresentar resultados superiores quando relacionados com aços “inoxidáveis” selecionados erradamente.

Freire Bandeira (2021) descreve que os aços inoxidáveis são basicamente ligas formadas por Ferro e Cromo, além de outros constituintes que em menores percentuais, como: Níquel, Molibdênio e outros elementos. Um aço carbono para ser classificado como inoxidável deve ter no mínimo 11% de Cromo, este é responsável pela formação de uma pequena camada protetora de óxido de cromo, onde sempre que exposta ao oxigênio a superfície a mesma irá resistir contra a corrosão. A sua resistência à corrosão pode ser aumentada consideravelmente com a adição de Níquel e Molibdênio (Callister, 2012).

Figura 1 - Efeitos de elementos de liga na curva de polarização.



Fonte: Livro Materiais de Construção (UPF).

Os elementos de ligam citados na Figura 1 podem determinar a microestrutura do aço, conforme Bertolini (2010). A característica de um aço inoxidável, assim como demais tipos de aços, pode ser mudada de acordo com seu microconstituente predominante na sua microestrutura, de acordo for os materiais podem ser martensíticos, ferríticos ou austeníticos (Callister, 2012).

A Tabela 1 indica a classificação dos principais aços inoxidáveis, bem como sua aplicação e suas propriedades mecânicas.

Tabela 1 – Característica e aplicações de aços inoxidáveis.

<b>MATERIAL (AISI)</b>	<b>MATRIZ</b>	<b>LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)</b>	<b>LIMITE DE RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO (MPa)</b>	<b>APLICAÇÕES</b>
304	Austenítica	515	205	Vasos Criogênicos, equipamentos para indústria química
316L	Austenítica	485	170	Construções com solda
446	Ferrítica	515	275	Moldes para vidro, câmaras de combustão
410	Martensítica (Recozido)	485	275	Canos de rifles, peças de motores de jatos

Fonte: adaptado de (Callister, 2012).

Como citado anteriormente, os aços são classificados em três grandes tipos de matrizes, onde Bertolini (2010) cita que:

- Aços Inoxidáveis Austeníticos: possuem uma baixa resistência ao escoamento e uma alta ductilidade. A combinação de Níquel e Cromo permitem uma boa resistência à corrosão em ambientes naturais, ou seja, sujeitos a corrosão atmosférica.

- Aços Inoxidáveis Ferríticos: possuem um teor de Cromo superior a 13% e baixo teor de Carbono. Possuem uma alta resistência à tração, quando comparados aos aços austeníticos. Sua ductilidade é prejudicada em temperatura ambiente. A sua resistência à corrosão é menor comparada aos aços de matriz austenítica.
- Aços Inoxidáveis Martensíticos: possuem um teor de Cromo próximo dos 13% e um alto teor de Carbono. Possuem alta resistência mecânica, próximas do 1000 Mpa, porém próximo a estes valores a sua tenacidade é prejudicada. Sua resistência a corrosão não é considerada boa.

### *2.1.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos*

Os aços inoxidáveis austeníticos, como citado anteriormente, são os que possuem maior resistência a corrosão. Estes aços são classificados como aços da série 3XX e alguns da série 2XX, onde podemos citar, principalmente, os aços tradicionais como 303, 304 e 316 (Villares Metals, 2023).

Os aços austeníticos são aços à base de Ferro, Cromo e Níquel e não são magnéticos. Nesta família incluem-se também os aços 301, 302, 304, 304L, 308, 316, 316L, 317, 321 e 347. O seu baixo teor de Carbono, sendo abaixo de 0,08% também é uma das suas características. Existem também aços com maior teor de elementos de liga, por exemplo manganês e nitrogênio – que são os elementos substituintes de parte do níquel como forma de reduzir o custo e manter a estabilização da austenita. Exemplos desta aplicação são aços da série 201, 202 e 204 que são considerados “superausteníticos” (Costa, 2021). Por isso são considerados que os aços inoxidáveis austeníticos podem ser divididos em dois subgrupos: série 300 e 200.

Os aços inoxidáveis austeníticos são muito utilizados e aplicados no ramo rodoviário em reservatórios, containers, vagões ferroviários. Também são aplicados em petroleiros como o costado e fundo dos tanques. Na indústria alimentícia são aplicados em refrigeradores de leite, barris de cerveja, entre outros.

Figura 2 - Aplicações de aços inoxidáveis austeníticos.



Fonte: adaptado de Aperam (2023).

A Tabela 2 mostra a composição química do aço AISI 304, de acordo com a norma ASTM A276 *Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes*. A norma especifica as especificações quanto a composição química e resistência mecânica de aços inoxidáveis comercializados em forma de barras e chapas. Deve-se esclarecer que os valores apresentados abaixo são valores de referência a percentuais máximos de cada componente.

Tabela 2 - Composição Química AISI 304.

<b>C (%)</b>	<b>Mn (%)</b>	<b>P (%)</b>	<b>S (%)</b>	<b>Si (%)</b>	<b>Cr (%)</b>	<b>Ni (%)</b>
0,08	2,00	0,045	0,030	1,00	18,0 – 20,0	8,0 – 11,0

Fonte: Adaptado de ASTM A276 (2010, p. 2).

As propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis AISI 304, de maior importância para o presente trabalho são apresentadas na Tabela 3. Esses valores também são referenciados pela norma ASTM A276.

Tabela 3 - Resistência Mecânica AISI 304.

Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Resistência ao Escoamento (MPa)	Alongamento Máximo	Redução da Seção / Deformação
515	205	40%	50%

Fonte: Adaptado de ASTM A276 (2010, p. 4).

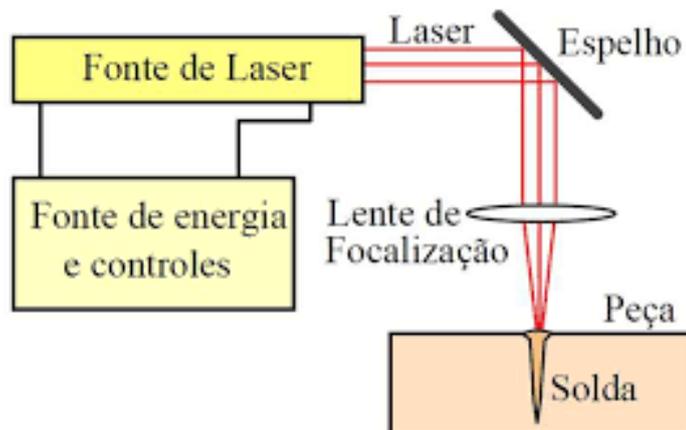
## 2.2 Soldagem a laser

A soldagem de materiais é um dos processos de fabricação existentes mais complexo e também um dos métodos que permite utilizar materiais de diferentes características em um mesmo projeto, podendo assim reduzir o custo dos projetos significativamente. Machado Guerra (1996) cita que soldagem é a união dos materiais através da fusão dos mesmos em um íntimo contato e adição de outros materiais fundidos na região soldada. Também pode ser descrita como a fusão dos materiais através da fase sólida ou semi-sólida, permitindo assim excelentes propriedades mecânicas nas uniões soldadas.

Durante o início da década de 60 o mundo conheceu uma nova forma de energia, denominada de feixe luminoso ou infravermelho. Este possuía uma grande densidade de potência do feixe e uma alta gama de aplicação, desde a cirurgias de olhos até a fusão de materiais. A energia referida é denominada de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (LASER). Os equipamentos laser sofreram diversas modificações ao longo do tempo, porém mantém algumas características próprias impares.

A Figura 3 demonstra que é necessário um material ativo que permita a conversão da energia externa em ondas coerentes, assim como é necessário um meio para fornecer energia ao material ativo e espelhos semi-transparentes para obrigar os raios à passarem várias vezes pelo metal ativo e assim sejam amplificados (Machado Guerra, 1996).

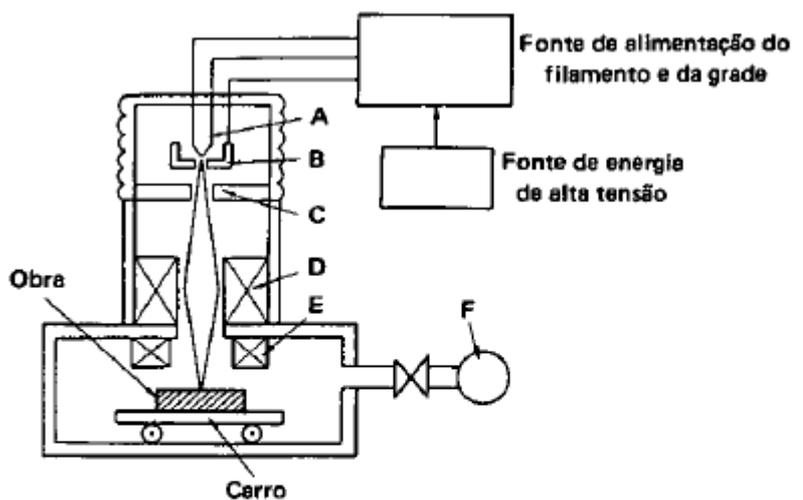
Figura 3- Princípio de funcionamento do LASER.



Fonte: Adaptado de Infosolda (2013).

Soldagem a laser pode ser considerada um processo de soldagem por feixe de elétrons e ocorre através da alta concentração de energia, promovendo uma penetração extremamente profunda no material desejado a soldar, por isso materiais com alta espessura podem ser soldados de uma vez só, assim como metais com alto ponto de fusão. A Figura 4 demonstra como funciona o processo de geração do laser (feixe de elétrons) e a sua soldagem.

Figura 4 - Esquema de funcionamento da solda laser.



- A – Filamento gerador
- B – Grade de controle da intensidade do feixe de elétrons
- C – Anodo acelerador
- D – Lente eletromagnética convergente
- E – Bobina de deflexão para mudança na direção do feixe de elétrons
- F – Bomba de vácuo para despressurização na câmara de soldagem, a fim de eliminar o amortecimento do feixe de elétrons

Fonte: Adaptado de (Taniguchi & Okumura, 1982).

Estudos como de Coelho (2012) apontam que o processo de soldagem a laser ocasiona uma cavidade chamado *keyhole*, que auxilia a transmitir o feixe para dentro do material por reflexões múltiplas, o que aumenta o acoplamento entre o feixe e o material. Assim, quando o feixe é deslocado ao longo da junta que se deseja soldar o material é fundido pelo próprio feixe. É importante salientar que velocidades muito altas provocam um rebaixo no *keyhole*, assim como velocidades muito baixas provocam rebarbas e furos na região soldada.

A soldagem a laser (LBW) é realizada quando a energia da luz emitida por uma fonte de laser é focada em uma peça de trabalho e assim funde os materiais. A soldagem a laser é uma das técnicas mais aplicadas e úteis para fornecimento de alta energia e menos deformação possível na zona termicamente afetada pelo calor (ZAC) (Alhajhamoud, Mohamad; Candan, Levent; Alp Ilgaz, Mehmet; Cinar, Ibrahim; Ozbey, Sayit; Corovic, Selma; Miljavec, Damijan; Kayahan, Ersin, 2022). O processo de fabricação por soldagem a laser possui diversas vantagens quando comparada a outros métodos convencionais (Coelho, Bruno Nazário ; Fernandes Lima, Milton Sérgio; Rodrigues da Costa, Adilson, 2013).

Podemos citar aspectos positivos e negativos referentes a sua aplicação, sendo necessário uma análise completa para definição ou não da implementação deste processo na indústria. Abaixo podemos citar, conforme Guerra (1996), aspectos positivos da aplicação do processo:

- Alta densidade de potência do feixe;
- Baixa energia necessária para realização da soldagem;
- Pequenas distorções e zona termicamente afetada pelo calor, baixa tensão residual;
- Velocidades de soldagem altas;
- Possibilidade de automação;
- Necessidade de preparação da junta com alta qualidade, fazendo com que se aumente o nível de criticidade dos processos anteriores;
- Capacidade de soldagem de materiais dissimilares;
- Possibilidade de utilizar material de adição.

Assim como possui aspectos muito positivos, possui alguns defeitos que ocasionam a criticidade da análise durante a escolha deste processo, tais como:

- Tolerâncias para posicionamento da junta muito apertadas;

- Alto investimento inicial;
- Possibilidade de criação de porosidade durante o resfriamento, ocasionado pelas altas taxas de resfriamento;
- Criação de microestruturas frágeis durante o resfriamento, devido a sua alta velocidade;
- Limitado a algumas espessuras, de acordo com o desejo de penetração do projeto.

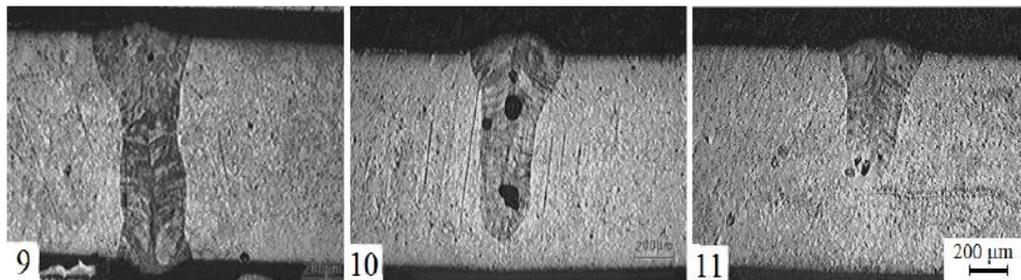
### **2.3 Soldagem a Laser de Aços Inoxidáveis**

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem uma alta soldabilidade e podemos limitar a formação de trincas a quente através da alta pureza metalúrgica deste aço, assim como dos consumíveis que são utilizados durante o processo de soldagem (Kurc-Lisiecka, A.; Lisiecki, A., 2020).

Um dos aspectos que deve ser considerado durante a seleção do material e do processo de soldagem em questão – soldagem a laser – é a alta taxa de resfriamento, que pode ocasionar trincas devido a precipitação de carbonetos, onde em temperaturas entre 873 K – 1173 K ocorre a união do cromo com a estrutura de carbonetos, tornando assim uma região dúctil e frágil (Alhajhamoud, Mohamad; Candan, Levent; Alp Ilgaz, Mehmet; Cinar, Ibrahim; Ozbey, Sayit; Corovic, Selma; Miljavec, Damijan; Kayahan, Ersin, 2022).

Alguns aspectos devem ser considerados durante a execução da soldagem de materiais inoxidáveis, como: potência do laser, velocidade de soldagem, vazão de gás, natureza do gás, distância focal e o ângulo de soldagem. As porosidades são mais fáceis encontradas em soldas que apresentam penetração parcial, podendo assim influenciar na resistência mecânica da junta soldada, com até 50 mm/segundo, conforme citado por Coelho et al. (2021).

Figura 5 - Micrografia de juntas soldadas de aço inoxidável AISI 316.



Fonte: Adaptado de (Nazário Coelho, 2012).

A seleção correta dos parâmetros de soldagem influencia na metalurgia da soldagem dos aços inoxidáveis, principalmente se tratando de um processo com alta potência, baixa energia e alta taxa de resfriamento. A microdureza na zona de fusão é reduzida e relacionada com a entrada do feixe de laser, ou seja, quanto maior a largura do feixe, maior a queda da microdureza no metal de solda. Podemos afirmar que a resistência à tração não é inferior do metal de base da chapa (Kurc-Lisiecka, A.; Lisiecki, A., 2020).

O resfriamento rápido ocasionado acarreta em um refino da microestrutura na zona fundida podem fazer com que aumente a microdureza nessas regiões (Freire Bandeira, 2021).

A soldagem de aços inoxidáveis por si só já é considerada complexa devido à alta quantidade de elementos de liga, podendo influenciar na formação de zonas frágeis e alterando as propriedades mecânicas do material de base. Conforme Taniguchi & Okumura (1982), os materiais austeníticos possuem uma melhor soldabilidade que os demais grupos (martensíticos e ferríticos), porém a forma de resfriamento da zona fundida pode ocorrer a precipitação de carbonetos de matriz cristalina. Esta matriz poderá prejudicar as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão deste material. Uma estrutura inteiramente austenítica pode influenciar na formação de trincas a quente.

#### 2.4 Resistência a fadiga de juntas soldadas a laser

O ensaio de fadiga normalmente ocorre ao utilizar cargas dinâmicas cíclicas em um corpo de prova normalizado (Garcia, Spim, & Santos, 2012). A fadiga pode ser considerada uma falha que ocorre em um determinado material sujeito a tensões dinâmicas e variáveis, onde poderá ocorrer uma falha com tensões em níveis inferiores ao limite de resistência a tração e escoamento do material condicionado a uma carga

estática. A maior causa individual de falha dos metais (aproximadamente em 90% destes) está relacionada com a falhas ocasionadas por fadiga, onde a mesma é catastrófica na maioria das vezes (Callister, 2012).

A tensão residual induzida termicamente por um processo de fabricação por soldagem (ou outro processo que utiliza de formas térmicas para sua manufatura) pode ser um influenciador do aumento das tensões residuais em uma junta soldada, principalmente as soldadas a laser, devido ao grande aporte térmico gerado pela concentração do feixe de laser na poça de fusão. O processo de soldagem a laser possui uma alta velocidade de resfriamento, portanto, este também pode ser um causador de tensões residuais durante a solidificação da zona de fusão da junta. Não existem grandes estudos que relacionem a resistência a fadiga de juntas soldadas a laser com a resistência a fadiga (Mirim, 2011). De acordo com Vaara, Kunnari & Frondelius (2020), a fabricação de produtos e componentes que utilizam de processos de fabricação com processos térmicos, como o processo de soldagem, podem desenvolver tensões residuais nos materiais. As tensões residuais são oriundas, normalmente, da transformação de fase dos materiais (Vaara, Kunnari, & Frondelius, 2020).

A soldagem a laser atualmente está sendo aplicada nas indústrias que utilizam os aços inoxidáveis duplex, onde o maior desafio está na garantia das propriedades mecânicas, como a resistência a fadiga. A influência do processo de soldagem a laser na resistência a fadiga pode estar relacionado aos parâmetros utilizados no processo (Odermatt, et al., 2021). O autor cita que em alguns casos ainda, pode-se aumentar a resistência a fadiga em duas vezes quando comparada a outras condições.

Li, Geng & Jiang (2023) citam que a qualidade das juntas afeta diretamente na integridade estrutural dos conjuntos soldados e o seu desempenho a resistência a fadiga está relacionado com sua microestrutura formada durante este processo, bem como o tamanho de grão. O aumento da resistência a fadiga em juntas soldadas a laser pode ser evidenciado principalmente em juntas soldadas com espessuras menores que 10 milímetros (Li, Geng, & Jiang, 2023).

Devido a não garantia da homogeneidade da penetração de soldagem ao longo do comprimento da junta soldada, poderá ocorrer falhas na microestrutura interna do material, podendo prejudicar as propriedades mecânicas das juntas. A distribuição não homogênea da microestrutura na raiz da solda pode ser um dos principais problemas devido a sua alta taxa de resfriamento, assim como a sua falta de penetração na raiz (Li, Geng, & Jiang, 2023).

Podemos notas que tanto Li, Geng & Jian (2023), assim como Mirim (2011) citam que a alta taxa de resfriamento do material pode afetar diretamente a resistência a fadiga, principalmente durante a formação do seu microconstituente.

Tsay, Young & Chen (2003) citam que as tensões residuais de compressão podem melhorar a vida em fadiga, mas a tensões residuais de tração que ocorrem durante o processo de soldagem aumentam o crescimento de trincais por fadiga em algumas ligas metálicas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma da Figura 6 apresenta a sequência lógica de desenvolvimento do trabalho planejado, de acordo com as diretrizes estabelecidas desde o escopo inicial até a finalização do trabalho com as análises de resultados. O fluxograma apresenta desde a soldagem experimental até o procedimento experimental realizado para analisar os resultados desejados.

A seleção dos parâmetros de soldagem do equipamento de solda a laser foi realizada através do auxílio da tabela de parâmetros do fornecedor do equipamento. Posteriormente definiu-se as condições que seriam aplicadas as juntas, principalmente considerando a realidade dos processos de fabricação e das inerências que o projeto da junta pode trazer a resistência mecânica do componente.

A partir da fase de planejamento com a definição da proposta e das condições de contorno, foram definidos os ensaios e caracterizações que seriam realizadas nos corpos de provas para que fosse possível observar os resultados das variações propostas.

A caracterização mecânica das juntas contempla todos os ensaios de tração necessários para analisar a resistência ao limite de escoamento, bem como o limite de resistência máxima. Estes resultados auxiliaram na definição das cargas que seriam utilizadas para os ensaios de fadiga, que estão contemplados dentro da caracterização mecânica. O desenvolvimento do perfil de microdureza Vickers da junta auxilia no entendimento da influência do processo de fabricação sobre a ZTA da junta soldada.

A caracterização metalúrgica é contemplada pela análise química dos materiais utilizados no processo de fabricação (metal de base). As análises metalográficas apontam resultados interessantes que auxiliam na caracterização metalúrgica da junta soldada.

Por fim, todos resultados foram analisados e relacionados para que fosse possível fazer uma conclusão do trabalho.

Figura 6 - Fluxograma do planejamento do trabalho.



Fonte: O Autor (2023).

### 3.1 Material de base

O aço utilizado neste trabalho foi o aço inoxidável AISI 304 desenvolvido pela Aperam. A fabricação dos corpos de provas, bem como o material foi cedido pela empresa Stara Indústria de Implementos Agrícolas. O corte dos materiais ocorreu através do processo de corte a laser.

Os materiais de base dos corpos de prova com dimensões de 250 mm de largura por 350 mm de comprimento e 2 mm de espessura. A preparação das juntas ocorreu com bordas paralelas para execução da soldagem.

Para realizar a análise da composição química do material de base dos corpos de prova foi utilizado um espectrômetro de emissão ótica da marca OXFORD INSTRUMENTS, disponível no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade de Passo Fundo (UPF).

### 3.2 Consumíveis de soldagem

Para realização da soldagem a laser foi necessário a utilização de dois consumíveis extremamente importantes para o processo, tais como gás de proteção e também o metal de adição.

- **Metal de Adição:**

Conforme a norma AWS A5.9/A5.9M:2022 *Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods*, é indicado para o metal de base selecionado (AISI 304) a utilização do metal de adição ER308L, atingindo desta forma as propriedades mecânicas mínimas do material de base e não prejudicando a zona fundida.

O metal de adição utilizado foi com diâmetro de 1,00 mm e foi tracionado através de um alimentador paralelo ao equipamento de soldagem. A velocidade de alimentação do arame utilizada para o eletrodo foi de 1,2 m/min para a condição B e 1,5 m/min para a condição C.

- **Gás de Proteção:**

Para realização da proteção e da refrigeração do processo de soldagem a laser foi utilizado o gás Argônio 99,99% do fornecedor Messer com vazão de 15 l/min.

O gás foi indicado a ser usado pelo próprio fornecedor da fonte e através dos manuais do equipamento.

### 3.3 Soldagem dos corpos de prova

A soldagem dos corpos de prova foi realizada pelo processo de soldagem laser – LBW nas instalações fabris de uma indústria metalmeccânica fabricante de equipamentos. A fonte de soldagem a laser utilizada foi disponibilizada pela empresa H Soldas de Blumenau – SC com características de potência de laser de 1500 W.

A soldagem ocorreu de forma manual visando replicar a condição de fabricação para qual o estudo está sendo desenvolvido. O soldador que realizou a soldagem foi disponibilizado pela empresa H Soldas, sendo o responsável técnico pelas demonstrações do equipamento. A distância da tocha laser e a velocidade de soldagem foi controlada manualmente pelo operador.

Os parâmetros de soldagem utilizados, como potência e largura do feixe do laser foram definidos através de ensaios experimentais de soldagem, com o auxílio da tabela de parâmetros do equipamento fornecido, onde foram realizadas soldagens com diferentes parâmetros buscando validar a penetração total de soldagem na junta.

### 3.4 Procedimento de soldagem

A realização da soldagem dos corpos de prova foi realizada em três condições específicas. As condições foram determinadas considerando aspectos de fabricação das juntas mecânicas, principalmente considerando a aplicação prática em uma junta soldada sujeita a esforços de fadiga. Na Tabela 4 é possível verificar as condições de variações das geometrias das juntas soldadas.

Tabela 4 - Condições de realização das soldagens.

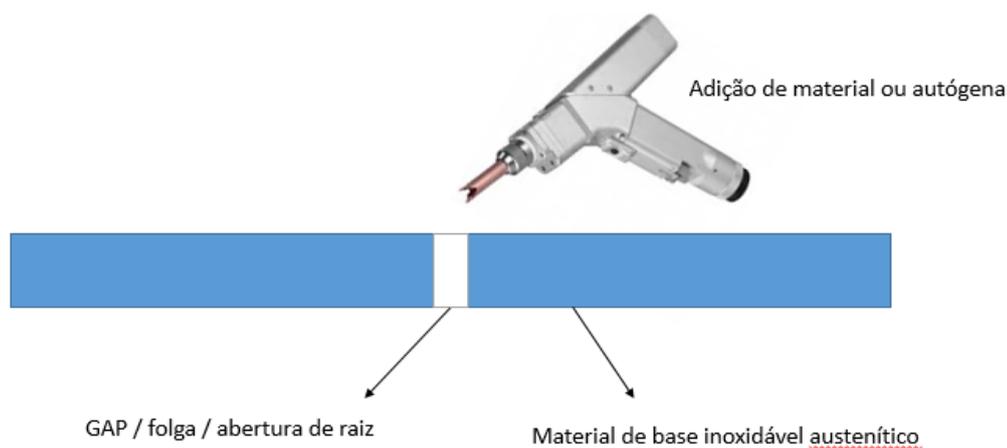
<b>CONDIÇÃO</b>	<b>ABERTURA DE RAIZ</b>	<b>METAL DE ADIÇÃO</b>
A	0 mm	NÃO
B	1 mm	SIM
C	0 mm	SIM

Fonte: O Autor (2023).

A abertura de raiz considerada é em função das variações dos processos primários de fabricação, condição está que existirá na aplicação do processo de soldagem a laser

em uma indústria de implementos agrícolas devido a variação dos processos primários de fabricação. Na Figura 7 é demonstrado a geometria da junta soldada e também a caracterização da mesma.

Figura 7 - Esboço da configuração da junta e processo de soldagem.



Fonte: O Autor (2023).

Os parâmetros de soldagem que foram utilizados estão especificados na Tabela 5. A indicação do fornecedor foi utilizada como base para realização dos testes de soldagem, visando uma penetração total e uma soldagem, de acordo com a inspeção visual, isenta de defeitos superficiais.

Tabela 5 – Parâmetros de soldagens utilizados em cada condição.

<b>CONDIÇÃO</b>	<b>POTÊNCIA (W)</b>	<b>FREQUÊNCIA (Hz)</b>	<b>LARGURA FEIXE (mm)</b>
A	1125	50	2,5
B	900	50	2,5
C	1200	40	2

Fonte: O Autor (2023).

### 3.5 Caracterização metalúrgica

#### 3.5.1 Macroscopia

As análises macroscópicas das juntas soldadas foram realizadas no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo

Fundo (UPF). Para realização do ensaio e registro das imagens foi utilizado o estéreomicroscópio da marca Olympus e modelo SZ61.

Na preparação das amostras, de acordo com a norma ASTM E 3, foram cortadas com uma cortadora metalográfica. Após as amostras foram embutidas em uma embutidora Panambra modelo Tempopress 2 Struers, utilizando resina baquelite e posteriormente realizando o lixamento com lixas de granulometrias de 220, 400, 600, 1000, 1500 e 2000. As amostras foram polidas na politriz Panambra modelo DP9 com solução de alumina com suspensão de 1  $\mu\text{m}$ .

Para revelação da macroestrutura foi utilizado o reagente ácido oxálico, com 90% de água e 10% de ácido oxálico. Também foi realizado um ataque eletrolítico de 12 Volts para revelação da microestrutura do material durante o período de 30 segundos.

### **3.5.2 Microscopia**

As caracterizações microestruturais foram realizadas conforme as orientações da norma ASTM E 3, com o seccionamento das amostradas soldadas na cortadora metalográfica refrigerada e o embutimento das mesmas na resina de baquelite na embutidora Panambra modelo Tempopress 2 Struers. As análises foram realizadas com uso de microscópio eletrônico de varredura de modelo Vega LM3 da marca Tescan. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo (UPF).

Após a preparação do corpo de prova foi realizado o lixamento com lixas com granulometria de 220, 400, 600, 1000 e 1500 e também o polimento com suspensão de alumina de 1  $\mu\text{m}$  na politriz Panambra modelo DP9. O ataque químico para revelação da microestrutura foi realizado através de uma solução com ácido oxálico, com 90% de água e 10% de ácido oxálico. Também foi realizado um ataque eletrolítico de 12 Volts para revelação da microestrutura do material durante o período de 30 segundos. Este procedimento também foi realizado para as amostras utilizadas para análises no microscópio eletrônico de varredura (MEV), realizando também nas dependências do Laboratório de Ensaio Mecânicos da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo (UPF) através do equipamento Tescan modelo VEJA 3 LM.

### 3.5.3 Fractografias

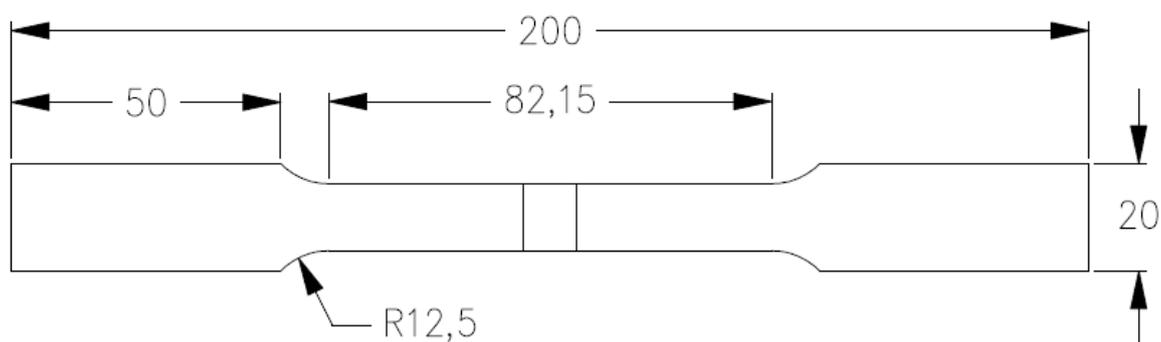
As análises fractográficas foram realizadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Tescan modelo Vega LM3. Através deste ensaio foi possível avaliar as superfícies de fratura após o ensaio de fadiga, analisando o tipo da fratura e o caminho que a mesma percorreu durante o seu processo de ruptura.

## 3.6 Caracterização mecânica

### 3.6.1 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram executados no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo (UPF), sendo estes realizados na máquina de ensaios universais da marca Schenck, modelo UPM-200. Os corpos de prova foram preparados através da norma ASTM E8/E8M-22 (2022), onde foram utilizadas as diretrizes da norma para dimensionamento do corpo de prova e também da preparação para execução do ensaio. As amostras foram soldadas e posteriormente foram cortadas, conforme a Figura 9, através de uma máquina de eletroerosão a fio. Este processo foi realizado nas dependências da empresa Stara Indústria de Implementos Agrícolas, localizada em Não-Me-Toque – RS.

Figura 8 - Corpo de prova de tração soldado (dimensões em mm).



Fonte: O Autor (2023).

Para cada condição de soldagem foram ensaiadas três réplicas, buscando determinar qual apresentaria maior resistência a tração após o processo de soldagem a laser. Estes

foram utilizados para determinação dos resultados e também a análise estatística do projeto. Para realização do ensaio foi aplicado uma carga uniaxial com taxa de deformação de 0,5 mm/min.

### **3.6.2 Ensaio de microdureza Vickers**

As análises dos ensaios de microdureza foi utilizada a escala Vickers, sendo realizada estas através do microdurômetro Shimadzu modelo HMV-G20ST no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo (UPF). As microdurezas das uniões soldadas foram medidas através do método especificado na norma ASTM E384, onde as medições iniciaram no centro da região fundida das soldas até o material de base.

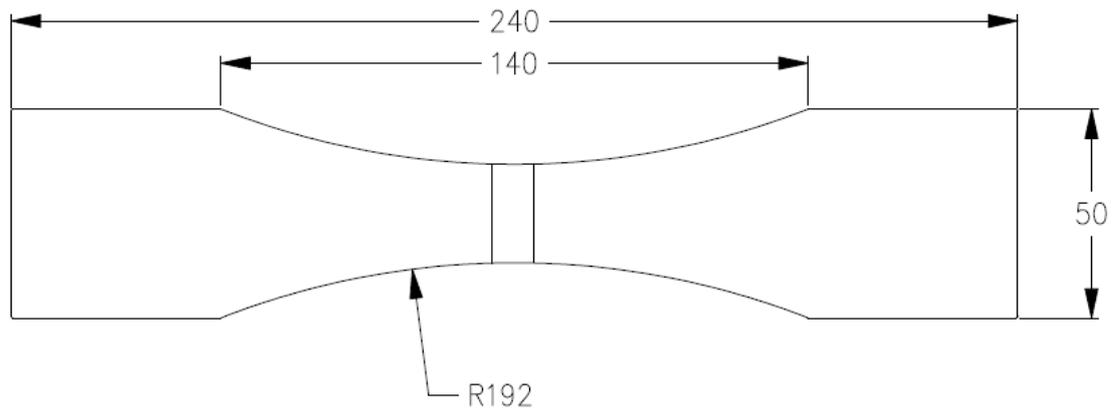
As cargas utilizadas nos ensaios foram de 0,50 Kgf com distância entre indentações de 0,3 mm com duração de 15 segundos.

Foram realizadas somente uma amostragem para cada condição, visando avaliar somente se a geometria da junta soldada, bem como a característica do processo de fabricação influenciariam ou não na dureza da ZTA.

### **3.6.3 Ensaio de fadiga**

Os ensaios de fadiga foram realizados em corpos de provas retirados das amostras soldadas. Os mesmos foram dimensionados de acordo com a norma ASTM E466, conforme a Figura 10 demonstra. Os ensaios de fadiga foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo (UPF). O equipamento utilizado para realização do ensaio foi uma máquina servo hidráulica da marca Shimadzu modelo EHF-EV101.

Figura 9 - Corpo de prova para ensaio de fadiga (dimensões em mm).



Fonte: O Autor (2023).

A carga aplicada para o ensaio de fadiga foi de 70% da tensão máxima da resistência a tração, considerando as médias dos ensaios de tração das diferentes condições de soldagem realizadas, descritos na Tabela 4. A razão de carga para o ensaio de fadiga utilizada foi de 10% e a frequência utilizada foi de 3 Hz. Esta condição está relacionada considerando esforços críticos que um equipamento poderá sofrer em situação real.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

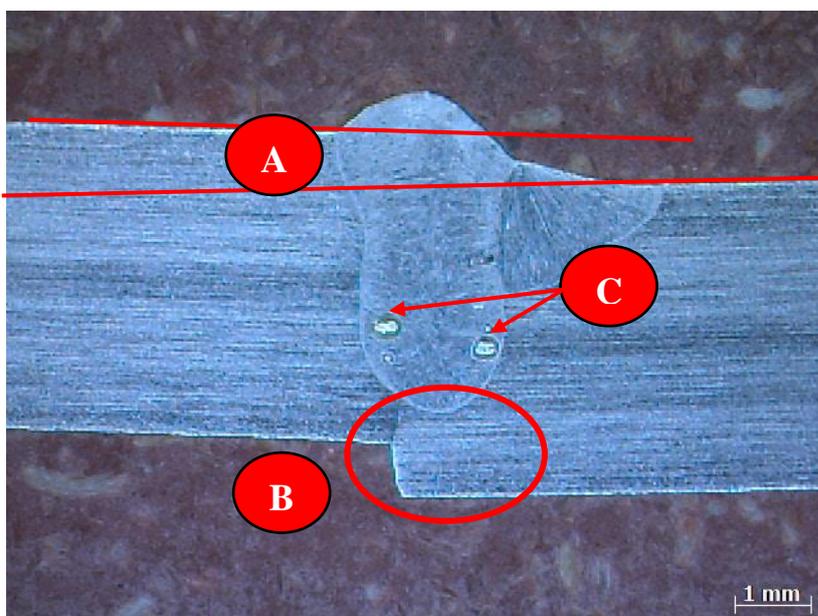
Neste capítulo são apresentados os primeiros resultados encontrados com os ensaios de soldagem preliminares realizados, onde foi verificado somente a penetração de soldagem através de macrografias para validação dos parâmetros e condições de soldagem utilizadas. Os resultados obtidos preliminarmente serão apresentados em caráter de apoio aos demais ensaios realizados posteriormente.

### 4.1 Resultados preliminares

Inicialmente foram realizadas soldagem para determinação dos parâmetros de soldagem ideais, determinados na Tabela 4. Para isso foram realizados soldagem preliminares onde identificou-se através de um ensaio macrográfico e micrográfico que seria necessário melhorar os parâmetros de soldagem para atingir a penetração total desejada, bem como corrigir alguns defeitos de soldagem encontrados.

Na Figura 11 é possível observar que foram encontrados defeitos de soldagem como: desalinhamento dos metais de base (A), falta de penetração total (B) e também porosidades internas (C).

Figura 10 - Macrografia de amostradas soldadas preliminarmente.



Fonte: O Autor (2023).

Conforme Nazário Coelho (2012), cordões que não houveram penetração total em aços inoxidáveis AISI 316 também apresentaram poros após a formação do *keyhole*. Este processo ocorre devido ao alta velocidade de resfriamento e conseqüentemente à alta solidificação da junta soldada.

Na Figura 12 é possível observar o metal de base em uma ampliação de 100 vezes, realizadas através do microscópio óptico. Podemos observar o contorno dos grãos, bem como a sua estrutura austenítica com maclas de recozimento.

Figura 11 - Micrografia metal de base AISI 304.



Fonte: O Autor (2023).

#### 4.2 Análise química do material de base

Os resultados encontrados na análise química de três corpos de prova do material de base AISI 304, foram comparados aos valores propostos pela norma para fabricação do material. A Tabela 6 demonstra os valores encontrados no ensaio realizado, bem como compara aos demais valores citados.

Tabela 6 - Composição química do material de base.

<b>AMOSTRA</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>
1	0,0236	0,542	1,68	0,0248	0,001	23,1	0,221	8,51
2	0,0222	0,553	1,69	0,0254	0,001	22,9	0,218	8,87
3	0,0225	0,567	1,72	0,0246	0,001	22,3	0,235	8,91
Média	0,0228	0,554	1,69	0,0249	0,001	22,8	0,224	8,76
Desvio Padrão	0,0006	0,010	0,01	0,0003	0,000	0,20	0,007	0,17
Norma						18,0		8,0
ASTM	0,08	1,00	2,00	0,045	0,030	–	-	–
A276						20,0		11,0

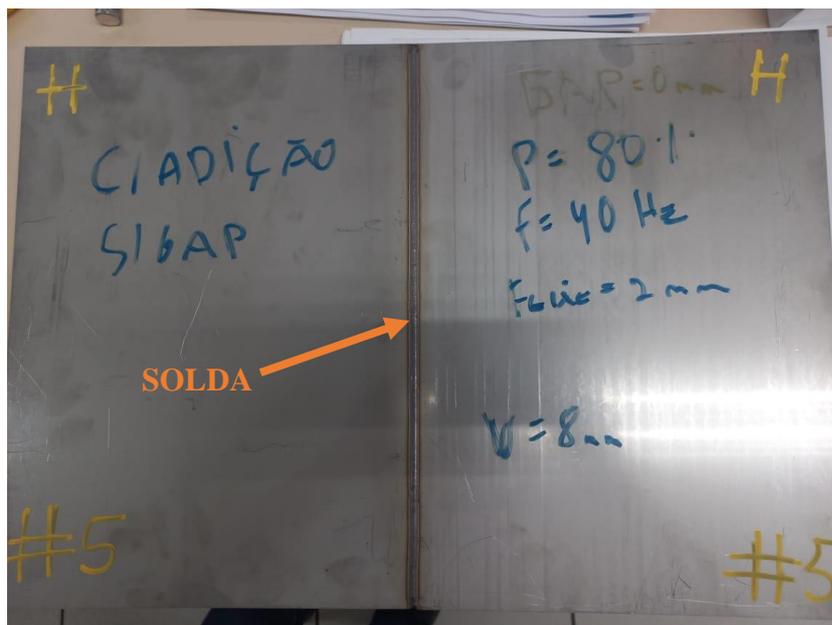
Fonte: O Autor (2023).

Conforme pode-se observar, pode-se identificar uma leve superioridade dos percentuais de Cromo do material ensaiado ao especificado na norma ASTM A276, conforme a Tabela 2.

### 4.3 Corpos de provas

Inicialmente apresentamos os resultados obtidos após a soldagem dos corpos de provas. Na Figura 13 pode-se verificar o corpo de prova soldado após a união das chapas desenvolvidas para posterior desenvolvimento das amostras para os ensaios mecânicos necessários.

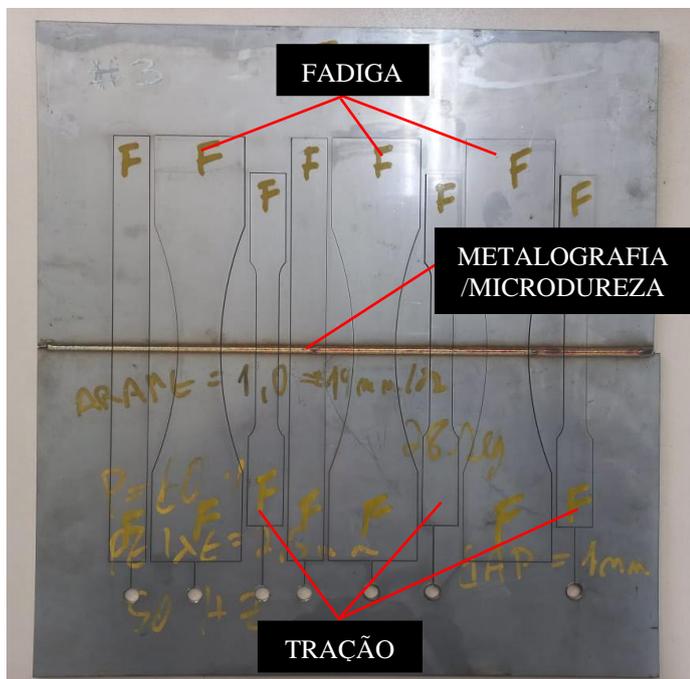
Figura 12 - Corpo de prova soldado.



Fonte: O Autor (2023).

A Figura 14 demonstra como o corpo de prova soldado com as geometrias das amostras dos corpos de provas para realização dos ensaios mecânicos, conforme demonstrado e exemplificado.

Figura 13 - Corpo de prova soldado com amostras de ensaios.



Fonte: O Autor (2023).

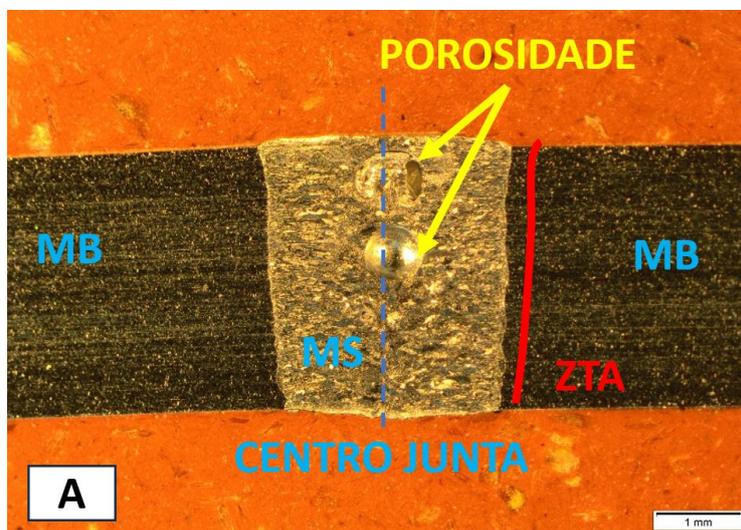
#### 4.4 Metalografia

Nesta etapa foram realizadas as análises referentes as amostras retiradas dos corpos de provas soldados para análise metalúrgica e microestrutural nos ensaios de macrografia e micrografia.

#### 4.4.1 Análise macrográfica

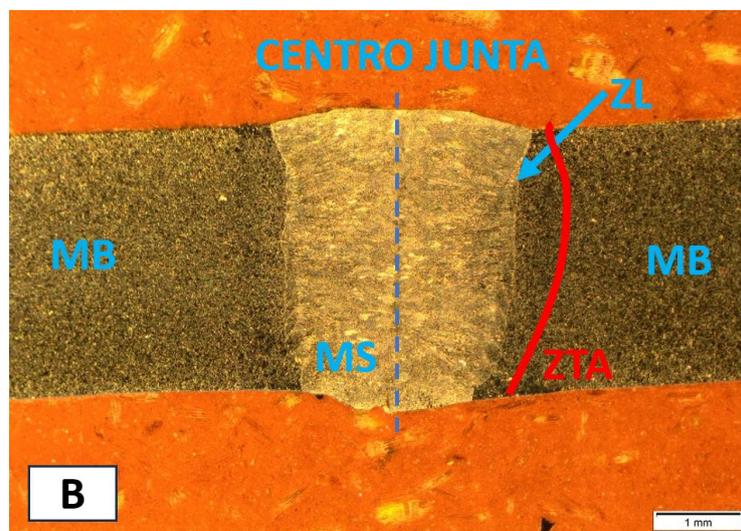
Nas Figuras 15, 16 e 17 é possível analisar os resultados encontrados nos ensaios macrográficos, verificando que foi encontrado uma penetração total da junta soldada nos corpos de prova. Também é possível identificar alguns defeitos de soldagem encontrados internamente, bem como também verificar a zona termicamente afetada (ZTA), zona de ligação (ZL), metal de base (MB) e metal de solda (MS).

Figura 14 – Macrografia – Condição A.



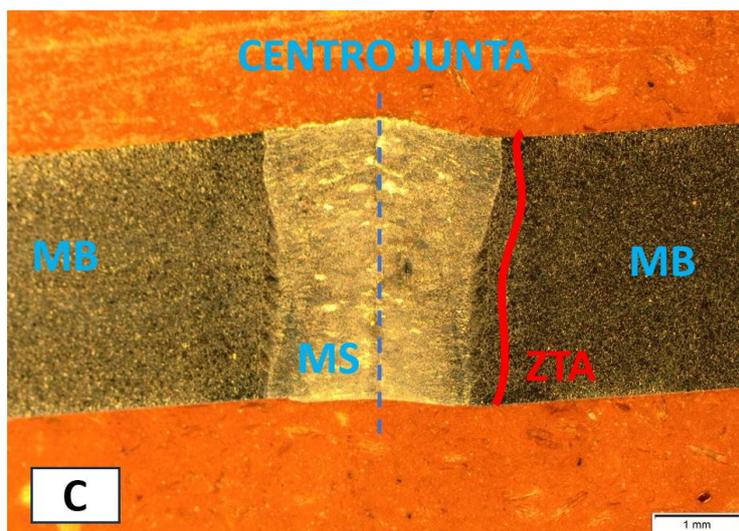
Fonte: O Autor (2023).

Figura 15 - Macrografia - Condição B.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 16 - Macrografia - Condição C.



Fonte: O Autor (2023).

É possível observar que na condição A, existe uma ZTA muito pequena quando comparada as demais condições. Na condição B e C, onde inseriu-se um metal de adição na realização do processo, podemos observar uma ZTA maior.

Na condição B, onde tem-se uma abertura de raiz de 1 mm, não é possível observar a presença desta na macrografia, assim ficando evidenciado a alta penetração e o preenchimento total da abertura de raiz com o metal de adição.

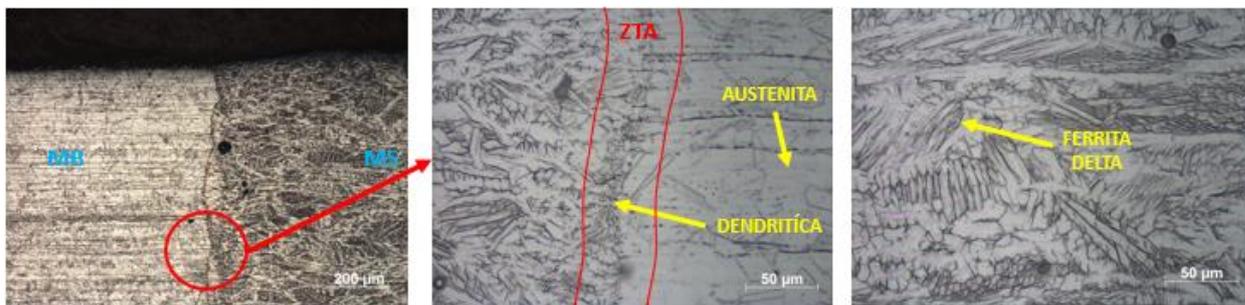
Também é possível identificar alguns defeitos internos, como porosidade, na condição A.

#### 4.4.2 Análise micrográfica

Durante esta etapa foram realizadas as análises microscópicas das amostras retiradas dos conjuntos soldados, buscando avaliar a influência do processo de soldagem a laser, bem como a adição ou não de material na ZTA e na zona de ligação dos materiais.

A microestrutura foi analisada nas regiões de interesse, como metal de solda (MS), metal de base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona de ligação (ZL). As Figuras 17, 18 e 19 demonstram o comportamento da microestrutura em função das condições de soldagens aplicadas, bem como também os principais defeitos presenciados nestas regiões, assim como a formação da microestrutura do material.

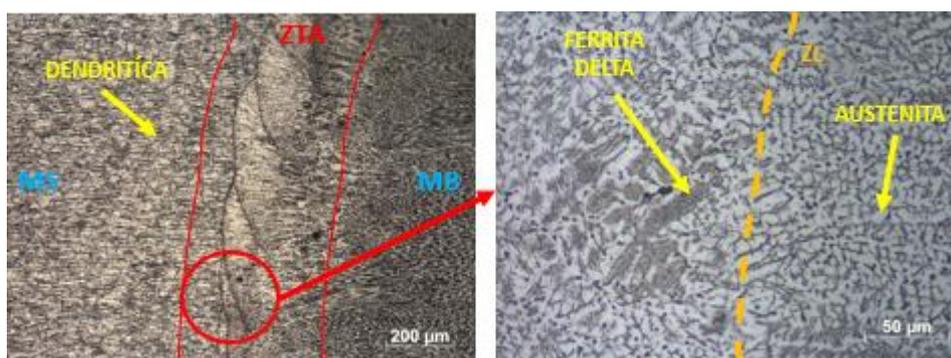
Figura 17 - Análise micrográfica condição A.



Fonte: O Autor (2023).

A Figura 17 demonstra alguns pontos que podemos observar na análises macrográficas também, como a pequena região da zona termicamente afetada. Como trata-se de um aço inoxidável austenítico, podemos verificar as formações de austenita e de ferrita delta. Também é possível observar a formação da zona dendrítica, onde ocorre a mudança do tamanho de grão ocasionado pela alta temperatura gerada pelo feixe de laser durante o processo de soldagem LBW.

Figura 18 - Análise micrográfica condição B.



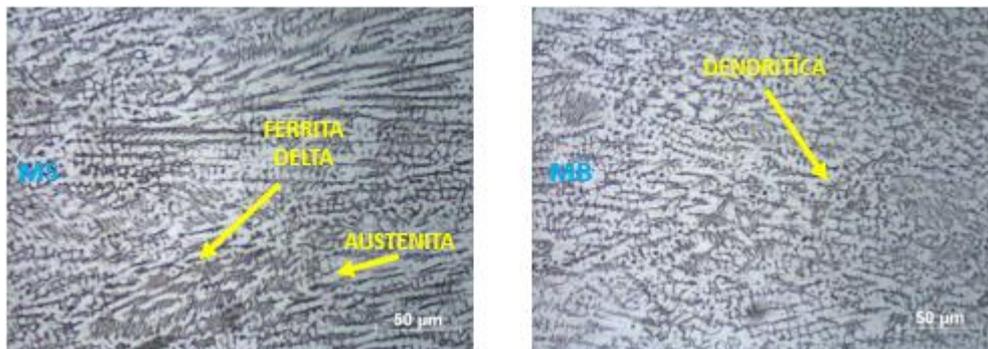
Fonte: O Autor (2023).

Na condição B tem-se a adição de material, onde observamos na Figura 18 que temos uma microestrutura diferente, mas com as mesmas características metalúrgicas que as demais condições. Podemos observar que a zona termicamente afetada é ligeiramente maior, devido a potência maior utilizada na parametrização do processo necessária para diluição do metal de adição na abertura de raiz imposta na condição de soldagem. Também podemos observar que a diluição da austenita é maior devido aos elementos de liga inclusos no metal de adição.

Na Figura 19 observamos a formação da microestrutura da condição C. Podemos observar a formação da ferrita delta na zona do metal de solda. Assim como na condição B, temos a adição de metal de solda, o que faz com que tenha uma zona dendrítica menos

perceptível e uma maior diluição da austenita devido aos elementos de liga existentes no metal de adição.

Figura 19 - Análise micrográfica condição C.



Fonte: O Autor (2023).

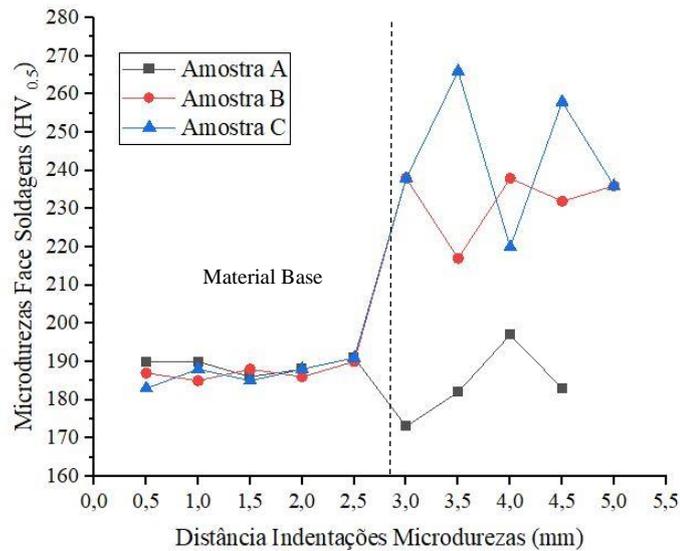
#### 4.5 Microdureza Vickers

Durante esta etapa foram realizadas as análises da microdureza na seção transversal do cordão de solda das amostras soldadas, foram realizadas indentações piramidais na superfície desejada. As marcações foram feitas em uma linha única, tanto na região do cordão de solda, quanto do metal de base.

Inicialmente foram realizadas as medições de cada amostra, tanto na face do cordão, quanto na raiz do mesmo. Após, com o auxílio de um software de análise estatística, realizou-se um comparativo entre as médias das durezas das regiões de material de base, ZTA e metal de solda. O método estatístico utilizado foi o teste de Tukey.

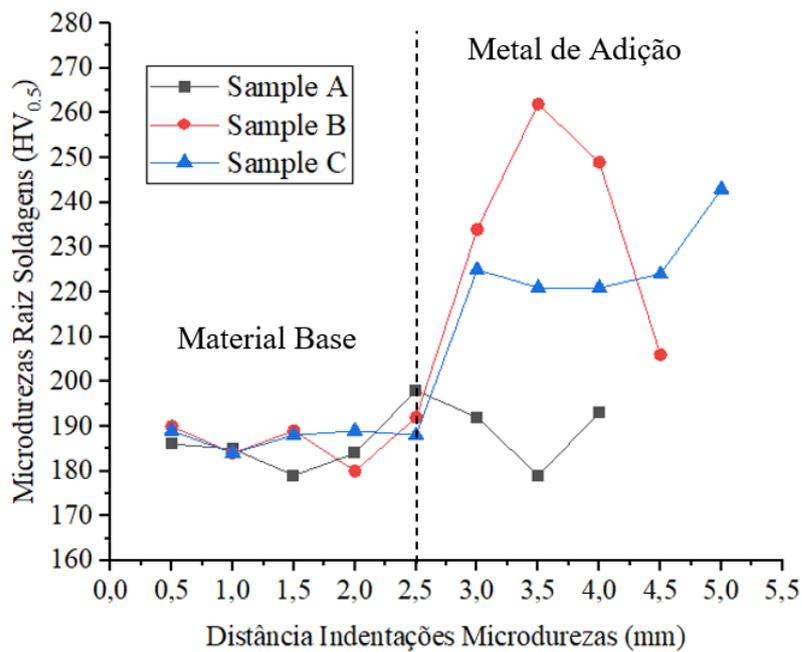
A Figura 20 demonstra o gráfico de comportamento da microdureza ao longo da condição A, B e C com as medições realizadas na face do cordão de solda. A Figura 21 demonstra o mesmo gráfico, porém para as medições realizadas na raiz do cordão de solda.

Figura 20 - Gráfico de Microdurezas - Face Cordão de Solda.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 21 - Gráfico de Microdurezas - Raiz Cordão de Solda.



Fonte: O Autor (2023).

O comportamento demonstrado na Figura 19 e 20 já era esperado para a amostra A, onde podemos observar que quando não se tem incremento do metal de adição e realiza-

se uma solda autógena não há diferença significativa na dureza na região avaliada. Percebe-se nas amostras B e C que existe um aumento significativo entre as durezas nas regiões avaliadas, evidenciando um pequeno endurecimento na região soldada. Este endurecimento na região soldada pode ser relacionado com a adição de metal nas condições citadas e também pode estar relacionada com o aumento da potência de soldagem para que este processo seja realizado nestas condições, fazendo com que haja um maior aporte térmico e também uma maior tensão residual nesta região, ocasionado assim um leve endurecimento desta região.

O aumento da microdureza na ZTA também está relacionado com a precipitação de carbonetos de cromo e a formação da ferrita delta, conforme evidenciado na seção 4.4.2.

#### 4.6 Ensaios de tração

Os ensaios de tração foram realizados e após analisados os dados encontrados das amostras ensaiadas, onde foram definidos as médias e desvios padrões do limite de escoamento e limite de ruptura máximo destas. A Tabela 7 demonstra os valores encontrados para cada amostra ensaiada dentro de cada condição soldada.

Tabela 7 - Dados dos ensaios de tração.

<b>Corpo de Prova</b>	<b>Tensão de Escoamento (MPa)</b>	<b>Tensão Máxima (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>
A1	287	649	27
A2	300	640	26
A3	294	648	27
B1	271	530	25
B2	286	538	20
B3	292	542	20
C1	282	620	23
C2	292	582	23
C3	275	568	27

Fonte: O Autor (2023).

A Tabela 8 demonstra a análise estatística realizada, apresentando os valores de desvio padrão para cada item avaliado.

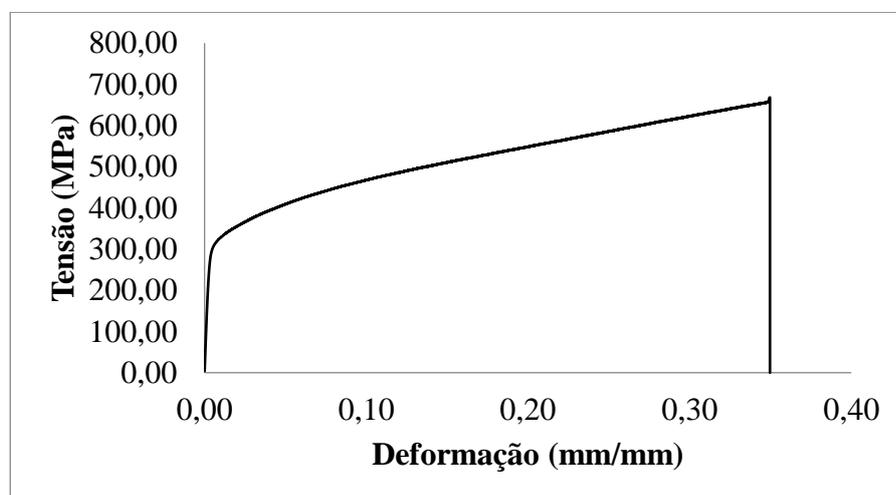
Tabela 8 - Ensaio de Tração - Desvio Padrão das Amostras.

Amostra	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento (%)
A	293,67 ± 6,50	645,67 ± 4,93	26,47 ± 0,35
B	283,00 ± 10,81	536,67 ± 6,11	21,37 ± 2,79
C	283,00 ± 8,54	590,00 ± 26,90	24,14 ± 2,11

Fonte: O Autor (2023).

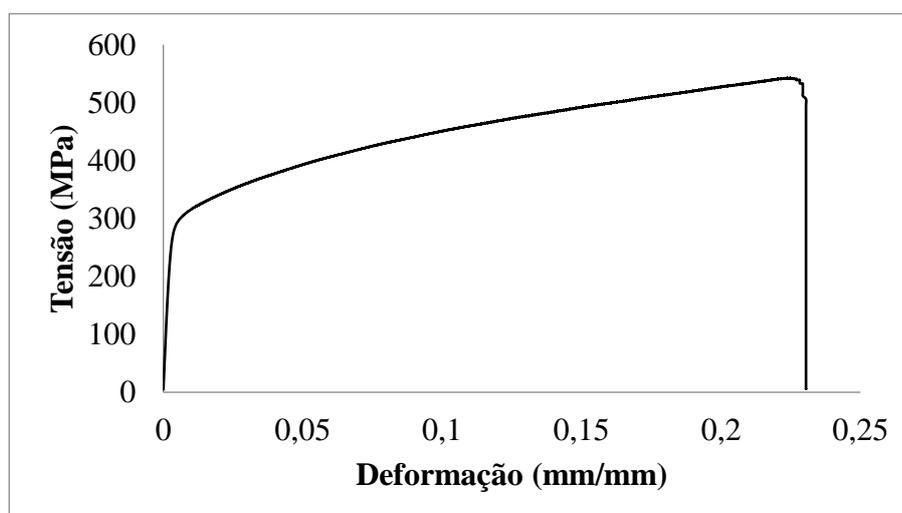
Os Gráficos 1, 2 e 3 demonstram as curvas obtidas para cada uma das condições de soldagem avaliada, conforme as geometrias e variações dos processos especificados na seção 3.4.

Gráfico 1 - Ensaio de tração condição A (amostra A3).



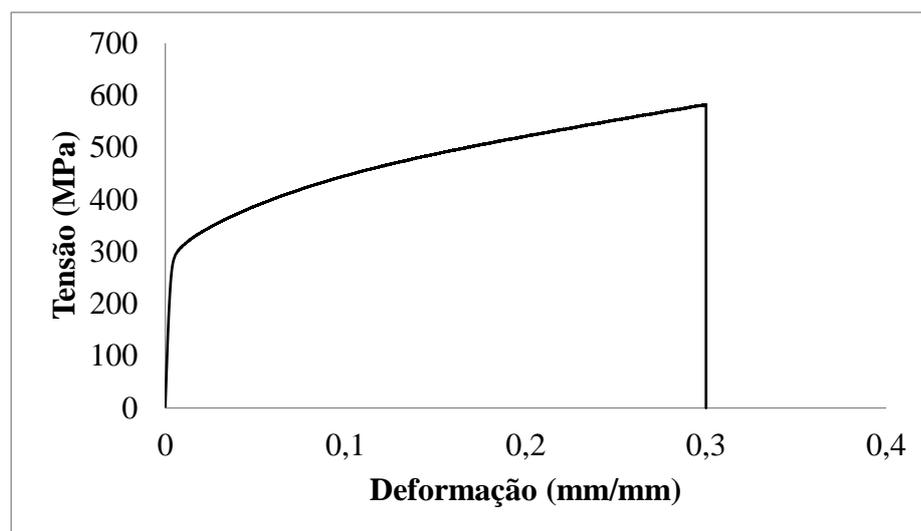
Fonte: O Autor (2023).

Gráfico 2 - Ensaio de tração condição B (amostra B3).



Fonte: O Autor (2023).

Gráfico 3 - Ensaio de tração condição C (amostra C3).



Fonte: O Autor (2023).

Observa-se através das curvas dos corpos de provas apresentam um comportamento diferente, ficando evidente que a condição A é a que mais possuiu resistência a ruptura e isso pode ser comprovado através dos dados apresentados na Tabela 8. Na condição B houve um decréscimo da resistência a tração devido a presença de um concentrador de tensões, que é a abertura de raiz colocado como condição no corpo de prova.

Após a realização dos ensaios de tração, os resultados foram analisados estatisticamente buscando entender o comportamento dos mesmos relacionados também as condições existentes em cada um dos corpos de provas.

Tabela 9 - Teste Tukey - Limite de Resistência ao Escoamento (MPa).

Amostra	N	Médias (MPa)	Grupo
A	3	293.67	A
B	3	283.00	A
C	3	283.00	A

Fonte: O Autor (2023).

Podemos observar que para o Teste de Tukey realizado na análise do limite de resistência ao escoamento, não houve diferenças significativas entre as amostras e condições, porém a condição A obteve um menor desvio padrão, demonstrando que teve a menor variabilidade entre as amostras ensaiadas.

Sabendo da existência da diferença das condições, principalmente relacionadas com a geometria da junta soldada e também da aplicação do metal de adição nas

condições B e C, podemos observar que houve uma diferença significativa entre as amostras A, B e C quando relacionadas com o limite máximo de resistência a tração, de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 - Teste Tukey - Limite de Resistência ao Escoamento (MPa).

<b>Amostra</b>	<b>N</b>	<b>Médias (MPa)</b>	<b>Grupo</b>
A	3	645.67	A
C	3	590.00	B
B	3	536.67	C

Fonte: O Autor (2023).

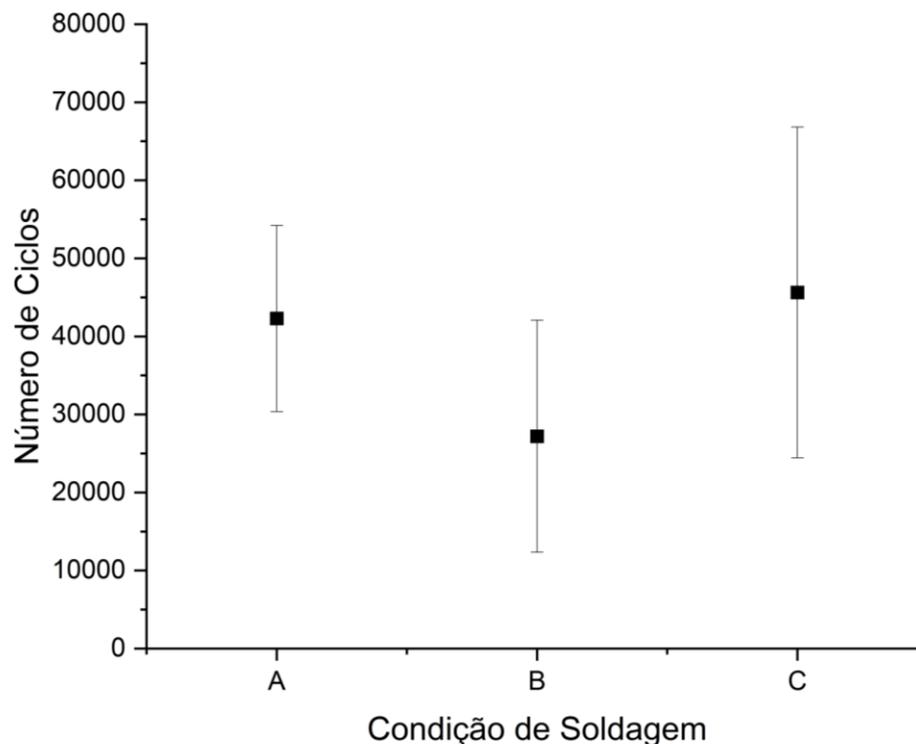
Podemos relacionar o aumento da resistência a tração máxima na condição A e C pela não existência de um concentrador de tensão, podendo estar relacionada com estes fatores o aumento significativo da resistência mecânica. A condição B possui um concentrador de tensão (abertura de raiz) e também tem o acréscimo de metal de adição, assim como na condição C, que podem estar relacionadas com a diminuição da resistência máxima a tração nestas duas condições.

#### **4.7 Ensaios de fadiga**

Os resultados encontrados no ensaio de tração, principalmente da tensão máxima, foram utilizados no ensaio de fadiga para determinação da resistência a fadiga, em número de ciclos, de cada condição ensaiada.

A Figura 22 apresenta o comportamento das amostras ensaiadas, realizando o ensaio com 5 corpos de provas de cada condição.

Figura 22 - Resistência a fadiga.



Fonte: O Autor (2023).

Os dados apresentados na Tabela 11 são referentes aos valores encontrados em cada amostra das condições ensaiadas.

Tabela 11 - Dados Ensaio de Fadiga - Condições Soldadas.

<b>DADOS</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>CICLOS</b>	58528	37021	46019
	33364	16560	39583
	28177	17024	80177
	46882	48677	22538
	44530	16725	39834
<b>MÉDIA</b>	42296,2	27201,4	45630,2
<b>DESVIO PADRÃO</b>	11922,95	14867,75	21195,79

Fonte: O Autor (2023).

Podemos observar uma alta dispersão dos dados, que podem estar relacionados com os fatores geométricos das juntas soldadas – principalmente na condição B. A condição A obteve uma resistência significativa a fadiga, porém obteve valores inferiores a condição C, o que não era esperado. A redução da resistência a fadiga na condição A pode estar relacionada com defeitos internos encontrados nas análises metalográficas.

Após a mensuração dos dados, foi realizado uma análise através do Teste de Tukey para avaliar se há diferença significativa entre as condições soldadas para uma confiabilidade de 95%, porém não houve diferença significativa, como demonstrado na Tabela 12.

Tabela 12 - Teste Tukey - Ensaio de Fadiga.

Amostra	N	Médias (MPa)	Grupo
C	5	45630	A
A	5	42296	A
B	5	27201	A

Fonte: O Autor (2023).

#### 4.8 Fractografias

Os processos de fadiga, citados os resultados anteriormente, ocasionam rupturas que ocorrem em cargas em condições dinâmicas aplicadas em determinado material.

As amostras analisadas apresentaram, na região de início da trinca, marcas de praia que são consideradas características típicas de fraturas por fadiga.

A Figura 23 mostra o corpo de prova com todas as etapas de uma fratura por fadiga. Podemos observar principalmente os pontos de início da fratura, bem como também marcas de praia, que indicam o sentido da propagação da trinca, e também o local de ruptura do material.

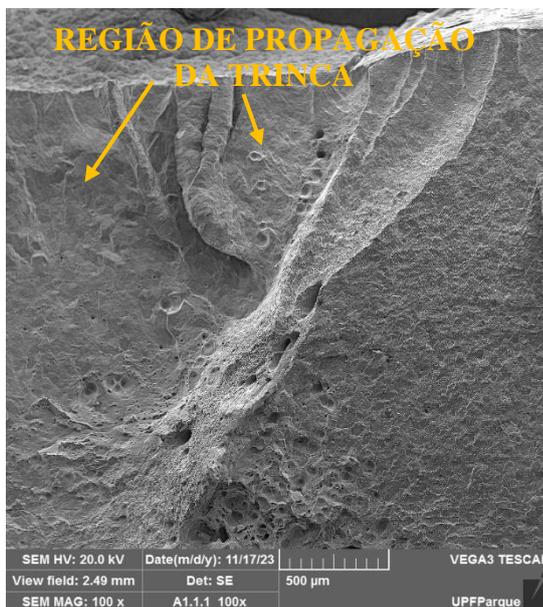
Figura 23 – Corpo de prova com ruptura – Condição A.

Fonte: O Autor (2023).

As marcas de praia do corpo de prova indicam que o mesmo sofreu esforços de fadiga até a sua ruptura, por isso todas as amostras que tiveram estas condições apresentaram essa característica.

Na Figura 24 podemos observar com mais detalhes o ponto de início da fratura da condição A de soldagem.

Figura 24 – Local de propagação de trinca – Condição A.

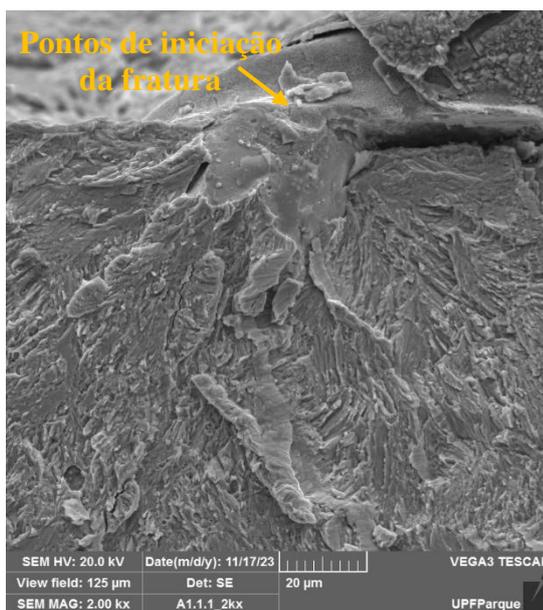


Fonte: O Autor (2023).

Podemos observar que existem pequenas porosidades que ocasionaram um concentrador de tensões para iniciar as trincas e conseqüentemente a ruptura do corpo de prova nessa condição.

Na Figura 25 podemos observar a região da fratura, demonstrando a região de estrangulamento do corpo de prova e a conseqüente ruptura da amostra, de acordo com o sentido de propagação da trinca.

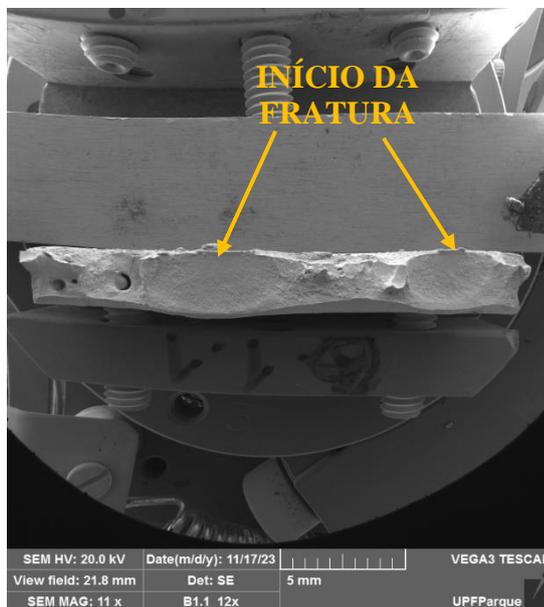
Figura 25 - Região de ruptura da fratura – Condição A.



Fonte: O Autor (2023).

A Figura 26, demonstra do mesmo formato da condição A, as etapas das fratura da condição B.

Figura 26 – Corpo de prova com ruptura – Condição B.



Fonte: O Autor (2023).

Na Figura 27 podemos observar uma das regiões de início da fratura, onde o ponto identificado mostra uma falta de fusão de soldagem na borda da chapa que ocasionou o início da ruptura do corpo de prova soldado na condição de soldagem B. A condição de soldagem B possui uma abertura de raiz de 1 mm e também a adição de metal, onde possivelmente não ocorreu a fusão necessária na face e raiz da junta soldada, deixando pontos sem união dos materiais que se tornaram pontos frágeis da junta soldada e suscetíveis a falhas estruturais.

Figura 27 - Região de início da fratura - Condição B.



Fonte: O Autor (2023).

A Figura 28 demonstra o ponto de propagação da fratura do corpo de solda na condição B de uma forma mais ampliada, onde é possível observar a forma da fratura e o caminho de propagação da trinca de fadiga.

Figura 28 - Região de ruptura da fratura - Condição B.

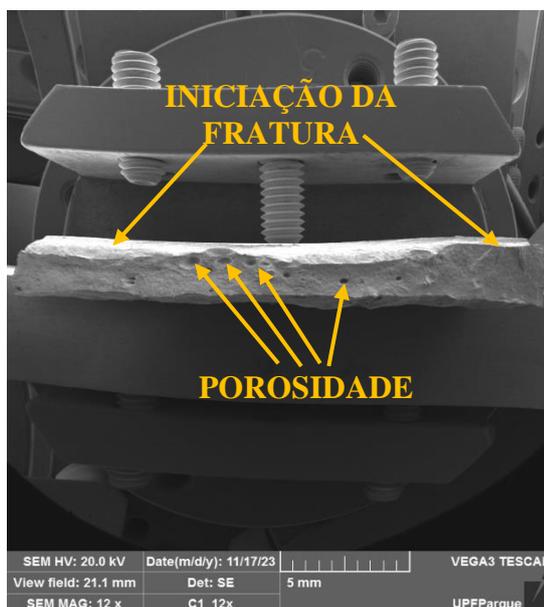


Fonte: O Autor (2023).

A Figura 29 demonstra o corpo de prova na condição C. Os pontos de iniciação de trinca identificados seguem as etapas anteriormente citadas que levam a fratura de um

esforço em fadiga. Também é possível observar pontos de formação de poros na região de fratura do material.

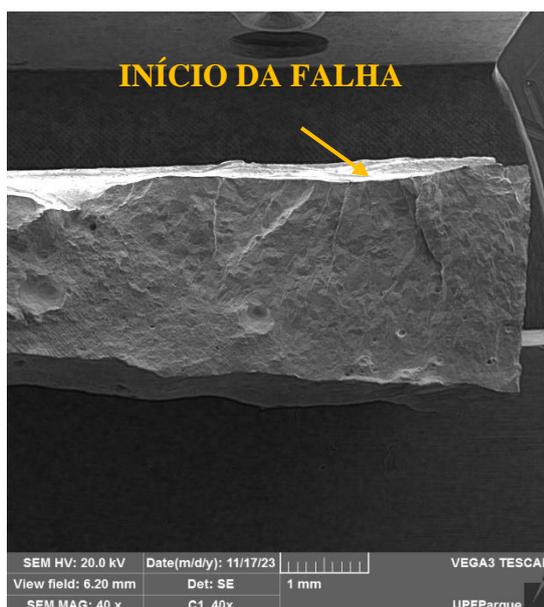
Figura 29 - Corpo de prova com ruptura - Condição C.



Fonte: O Autor (2023).

A Figura 30 mostra o ponto início da fratura na condição C. A condição não possui abertura de raiz, mas possui adição de metal durante a soldagem. É possível observar o efeito da geometria da margem do cordão como predominante para início da fratura.

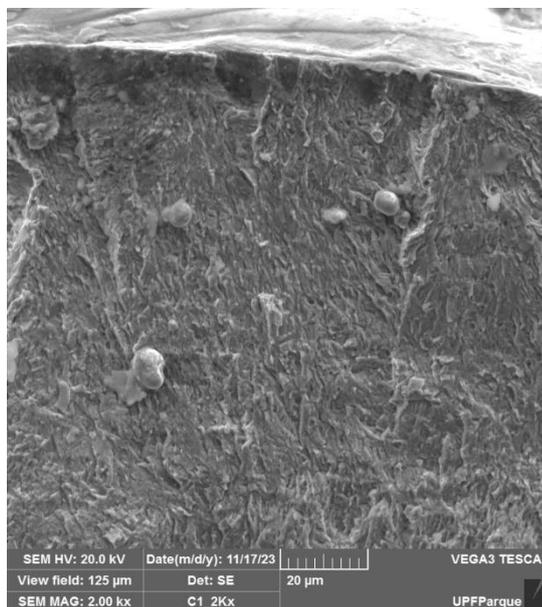
Figura 30 - Região de início da fratura (Condição C).



Fonte: O Autor (2023).

Na Figura 31 podemos observar o local da fratura, bem como também o sentido que a mesma ocorreu no corpo de prova da condição C.

Figura 31 - Região de ruptura da fratura (Condição C).



Fonte: O Autor (2023).

#### 4.9 Discussão dos Resultados

De acordo com os resultados encontrados, podemos relacioná-los com outros trabalhos realizados por diferentes autores.

Inicialmente foi desenvolvido testes de soldagem a laser LBW preliminares para que pudéssemos determinar os parâmetros de soldagem ideais para realização das amostras nas condições de soldagem desejadas para realização do estudo. Estes ensaios preliminares foram determinantes para determinarmos a forma de fixação e união dos materiais para formação da junta soldada, assim como também foi possível eliminar alguns defeitos de soldagem que poderiam prejudicar os resultados dos ensaios mecânicos que seriam realizados posteriormente.

De acordo com a norma ASTM A276 (2017), a análise química do material de base realizado estava dentro dos limites aceitáveis da mesma.

Os ensaios de metalografia realizados, tanto a macrografia, quanto a micrografia, apresentarem resultados importantes para discussão do trabalho. De acordo com Li, Geng & Jiang (2023), o aumento das propriedades mecânicas das juntas soldadas a laser está

diretamente ligado com a microestrutura formada, bem como também o tamanho de grão gerado pelas inerências do processo. Os resultados encontrados comprovam isso, onde os resultados encontrados nos ensaios mecânicos tiveram uma maior linearidade na condição A, onde nas micrografias podemos observar as regiões bem distintas, principalmente ocasionadas pelas características das juntas (sem metal de adição, sem abertura de raiz).

A microdureza Vickers identificou que a microdureza na condição A não tem diferença significativa entre os metais de base e metal de solda. Esse fenômeno é explicado devido a não ter presença de elementos de liga, bem como também o aporte térmico utilizado (este relacionado com os parâmetros de soldagem utilizados durante as demais condições) também foi menor. As condições B e C tem um aumento significativo da dureza, fazendo com que estes tenham uma maior fragilidade. Palanisamy, Rajendran & Kumar (2023) relatam que o aumento da dureza na zona de fusão pode estar relacionado a fatores como: tamanho de grão, transições de fases e microestruturas formadas. Os mesmos autores ainda citam que a diminuição da ZTA também pode fazer com que haja um aumento significativo da dureza, diferentemente do que encontramos no presente estudo.

Assunção et. al. (2019) cita que a utilização de corpos de provas para desenvolvimento de ensaios de tração é extremamente importante para determinação de parâmetros qualitativos. No presente trabalho foi desenvolvido ensaios de tração para avaliar a influência das cargas estáticas no limite de escoamento e limite de tração máximo dos corpos de provas, bem como também estes resultados determinaram as cargas que seriam utilizados no ensaio de fadiga – objeto principal do estudo. Podemos verificar nos ensaios de tração que os corpos de provas da condição A obtiveram uma maior resistência ao escoamento, bem como na condição B e C não houve uma diferença significativa. No limite de resistência a tração máxima, a condição A obteve melhor resultado.

Os ensaios de fadiga apresentaram uma alta dispersão dos dados, porém, as condições A e C obtiveram uma maior resistência a fadiga dentro das condições impostas no ensaio. Quando analisadas as condições A e C, por se tratarem de condições sem abertura de raiz, podemos verificar que na condição C temos dados de resistência a fadiga maiores que da condição A. Este fato pode ser explicado pela alta dispersão dos dados da condição C, assim como a o maior desvio padrão encontrado nesta condição também. A condição B obteve a menor resistência a fadiga, o que de acordo com Odermatt et. al. (2021) pode estar relacionado com a geometria da junta soldada, principalmente quando

houve um entalhe na junta que propicie o início da trinca da mesma. A condição B possuía uma abertura de raiz de aproximadamente 1 mm.

Portanto, as juntas com abertura de raiz e com metal de adição não obtiveram diferenças significativas entre elas, porém na resistência a fadiga teve uma redução considerável na junta que teve uma abertura de raiz de 1 mm (condição B). A redução da resistência a fadiga nesta condição pode ser explicada, como citado anteriormente, pela criação de um concentrador de tensões com esta abertura de raiz explicada pela falta de fusão gerada durante a soldagem do componente.

Em resumo, comparando as condições entre elas, temos o seguinte resultado:

Tabela 13 - Comparativo das resistências mecânicas entre as condições.

CONDIÇÕES	LIMITE DE ESCOAMENTO	LIMITE DE RUPTURA	RESISTÊNCIA A FADIGA
A-C	4%	9%	- 8%
A-B	4%	17%	36%
B-C	0%	- 10%	- 68%

Fonte: O Autor (2023).

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou a influência da geometria da junta soldada, bem como a influência da adição ou não de metal de adição na caracterização das propriedades mecânicas de uma junta de aço inoxidável soldada a laser LBW. Através da realização de ensaios de metalografia (micrografia e macrografia), microdureza Vickers, tração, fadiga e também da análise fractográfica pode-se concluir que:

- Todas as condições de soldagem (A, B e C) apresentaram penetração total na junta soldada, conforme evidenciado nas macrografias das amostras. Para o processo de soldagem a laser é desejável penetração total;
- A condição A apresentou porosidade interna, que pode ser explicado pela alta velocidade de resfriamento do processo de solda laser LBW, assim como também defeitos do fluxo de gás;
- A geometria da junta soldada, incluindo uma abertura de raiz de até 1 mm, possui influencia no limite de resistência a tração. A resistência foi reduzida em torno de 10%;
- A condição A, onde não se tem inclusão de metal de adição e nem abertura de raiz, é a condição com mais limite de escoamento do material e também a que menos possui dispersão dos dados encontrados nos ensaios realizados;
- A resistência a fadiga da condição A pode ter sido impactada devido a presença de porosidades internas na união soldada;
- Não houve diferenças significativas entre as condições A e C em relação a resistência a fadiga, ou seja, a adição de metal de solda não impacta na resistência a fadiga;
- A abertura de raiz de 1 mm da condição B representou uma redução de 36% da resistência fadiga da junta em uma comparação entre as médias, devido a esta abertura de raiz tornar-se um concentrador de tensões para os esforços aplicados no ensaio;
- A menor dureza apresentada foi na condição A (198 HV), enquanto as condições B e C não tiveram diferenças significativas entre os grupos (238 e 243 HV, respectivamente);

Com a finalização do estudo, podemos concluir que com a aplicação do processo de soldagem autógeno e sem abertura de raiz (condição A) obteremos as melhores condições

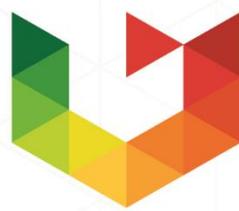
de resistência mecânica e a fadiga de juntas soldadas a laser (LBW) em aços inoxidáveis AISI 304. Também deve-se atentar as altas taxas de resfriamento geradas pelo processo de soldagem a laser, pois estas podem ocasionar defeitos internos que podem reduzir a vida útil destas juntas.

**REFERÊNCIAS**

- Alhajhamoud, M., Candan, L., Alp Ilgaz, M., Cinar, I., Ozbey, S., Corovic, S., Kayahan, E. (18 de Março de 2022). Laser welding of 316L austenitic stainless steel in an air and water environment. *Materials*, p. 16.
- AMERICAN STANDARD FOR TESTING AND MATERIALS. (2017). ASTM A276 Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes.
- AMERICAN STANDARD FOR TESTING AND MATERIALS. (2017). ASTM E3-11 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.
- AMERICAN STANDARD FOR TESTING AND MATERIALS. (2021). ASTM E466-21 Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials.
- AMERICAN STANDARD FOR TESTING AND MATERIALS. (2022). ASTM 3384-22 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.
- AMERICAN STANDARD FOR TESTING AND MATERIALS. (2022). ASTM E8/E8M-22 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. (2022). AWS A5.9/A5.9M:2022 Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods.
- Assunção, G. S., Andrade, E. P., Santos, W. A., Felizardo, I., & Bracarense, A. Q. (2019). Caracterização mecânica da região soldada de Tailor Welded Blanks (TWB) a partir do perfil de microdureza. *Soldagem & Inspeção*.
- Bertolini, L. (2010). *Materiais de construção: patologia, reabilitação e prevenção*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Callister, W. (2012). *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro: LTC.
- Canal Rural*. (Maio de 2023). Fonte: Canal Rural: <https://www.canalrural.com.br/noticias/economia/venda-de-maquinas-agricolas-bate-recorde-no-brasil-em-2022/>
- Coelho, Bruno Nazário; Fernandes Lima, Milton Sérgio; Rodrigues da Costa, Adilson;. (2013). Soldagem do aço inoxidável AISI 316 com laser à fibra de alta potência: influência dos parâmetros operacionais na micro dureza e na susceptibilidade à corrosão eletrolítica dos cordões de solda. *Revista Matéria*.
- Costa, A. L. (2021). *Aços e ligas especiais*. São Paulo: Blucher.
- Freire Bandeira, V. (2021). *Caracterização de placas de aço inoxidável AISI 316L corrugadas e soldadas a laser*. Joinville.

- Garcia, A., Spim, J., & Santos, C. (2012). *Ensaaios dos materiais* (2ª ed.). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: LTC.
- Geng, Y., Akbari, M., Karimipour, A., Karimi, A., Soleimani, A., & Afrand, M. (15 de October de 2019). Effects of the laser parameters on the mechanical properties and microstructure of weld joint in dissimilar pulsed laser welding of AISI 304 and AISI 420. *Infrared Physics & Technology*, 9.
- Kurc-Lisiecka, A.; Lisiecki, A.; (January de 2020). Laser welding of stainless steel. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*.
- Li, Y., Geng, S., & Jiang, P. (2023). Fatigue inhomogeneity of thick 316L stainless steel joints fabricated by ultra-high power laser-MIG hybrid welding. *Engineering Fracture Mechanics*.
- Machado Guerra, I. (1996). *Soldagem e técnicas conexas: processos*. Porto Alegre: editado pelo autor.
- Mirim, D. (2011). *INVESTIGAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NA SOLDAGEM A LASER ENTRE O AÇO CARBONO AISI 1010 E O AÇO INOXIDÁVEL AISI 304*. IPEN, São Paulo.
- Nazário Coelho, B. (2012). *Soldagem a Laser dos Aços Inoxidáveis AISI 304 e AISI 316: Análise Microestrutural em Função dos Parâmetros Operacionais*. Ouro Preto: REDEMAT.
- Odermatt, A., Ventzake, V., Dorn, F., Dinsé, R., Merhof, P., & Kashaev, N. (2021). Effect of laser beam welding on microstructure, tensile strength and fatigue behaviour of duplex stainless steel 2205. *Journal of Manufacturing Processes*.
- Oliveira, O. M. (2015). *COMPORTAMENTO DA VIDA EM FADIGA DE JUNTA SOLDADA DO AÇO LN-700*. Passo Fundo: UPF.
- Palanisamy, S., Rajendran, R., & Kumar, S. S. (2023). Effect of incident angle on weld microstructure and mechanical properties of laser beam welded nitronic -50 austenitic stainless steel joints. *Micron*, 11.
- Prima Power. Disponível em: <https://www.primapowerlaserdyne.com/laser-welding-of-stainless-steels/>.  
 Fonte: Prima Power:  
<https://www.primapowerlaserdyne.com/laser-welding-of-stainless-steels/>.  
 Acesso em: maio 2023.
- Sun, J., Nie, P., Feng, K., Li, Z., Guo, B., & Jian, E. (2017). The elimination of pores in laser welds of AISI 304 plate using different shielding gases. *Journal of Materials Processing Tech*.
- Taniguchi, C., & Okumura, T. (1982). *Engenharia de soldagem e aplicações*. Tóquio: LTC.

- Tsay, L., Young, M., & Chen, C. (2003). Fatigue crack growth behavior of laser-processed 304 stainless steel in air and gaseous hydrogen. *Corrosion Science*.
- Vaara, J., Kunnari, A., & Frondelius, T. (2020). Literature Review of Fatigue Assessment Methods in Residual Stressed State. *Engineering Failure Analysis*.
- Villares Metals. *Villares Metals*. Fonte: Villares Metals: <https://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Inoxidaveis/Austeniticos>. Disponível em: <https://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Inoxidaveis/Austeniticos>. Acesso em: jun. 2013.
- Wang, X., He, P., Kong, Q., Zheng, C., Sun, Y., Li, J., . . . Zhou, Q. (2023). Effects of laser welding on the microstructure evolution and corrosion resistance of a novel nitrogen-containing austenitic stainless steel QN2109. *Journal of Materials Research and Technology*.
- Zhou, L., Zhao, T., Yu, Y., Liu, P., & Pan, X. (2022). Effect of Laser Shock Peening on High-Cycle Fatigue Performance of 1Cr18Ni9Ti/GH1140 Weld. *Metals*, p. 12.



**UPF**  
UNIVERSIDADE  
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José  
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900  
(54) 3316 7000 - [www.upf.br](http://www.upf.br)