

**RAFAEL MARQUES BORGES PACHECO**

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E METALOGRÁFICA  
DE JUNTAS SOLDADAS A LASER PARA  
APLICAÇÃO EM EQUIPAMENTO AGRÍCOLA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2023

**RAFAEL MARQUES BORGES PACHECO**

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E METALOGRÁFICA  
DE JUNTAS SOLDADAS A LASER PARA APLICAÇÃO  
EM EQUIPAMENTO AGRÍCOLA**

**Projeto de Conclusão de Curso** apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **BACHAREL** em **ENGENHARIA MECATRÔNICA**.

**Área de Concentração:** Materiais

**Orientadora:** Profa. Dra Rosenda Valdés Arencibia

**UBERLÂNDIA - MG**

**2023**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

P116 Pacheco, Rafael Marques Borges, 1999-  
2023 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E METALOGRAFICA DE JUNTAS  
SOLDADAS A LASER PARA APLICAÇÃO EM EQUIPAMENTO AGRÍCOLA  
[recurso eletrônico] / Rafael Marques Borges Pacheco. -  
2023.

Orientadora: Rosenda Valdés Arencibia.  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em  
Engenharia Mecatrônica.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

1. Mecatrônica. I. Arencibia, Rosenda Valdés, 1969-,  
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia.  
Graduação em Engenharia Mecatrônica. III. Título.

CDU: 621.03

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:  
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me proporcionar pessoas especiais ao meu lado durante toda a minha vida. Agradeço também à minha família, meus pais, Adriana e Fábio, por se esforçarem ao máximo sempre para me proporcionar uma vida melhor e mais confortável. Aos meus irmãos, Felipe e João Antônio, por sempre serem ótimos companheiros de vida e tornarem os dias mais divertidos e a vida mais leve.

À minha namorada, Júlia Durães, pela resiliência nos momentos de ausência. Agradeço por todos os momentos de afeto e companheirismo. Obrigado por confiar em mim sempre.

A todos os membros do time de Engenharia de Fábrica – PDP da John Deere. Em especial àqueles que me ajudaram efetivamente com o trabalho, Luiz Fernando Lacerda e Anderson Lele. Ainda ao Danilo Albernaz que mostrou todo empenho e esforço em proporcionar os meios para o andamento do projeto e ao Bruno Rafael Silva por todos os ensinamentos e diretrizes.

À professora Dra. Rosenda Valdés Arencibia por aceitar me orientar neste trabalho e estar presente em todos os momentos de necessidade. Agradeço a paciência, disponibilidade e todas as orientações que me fizeram construir um trabalho sólido.

Ao engenheiro Rodrigo Freitas e à engenheira Joyce Antunes pelo suporte técnico desde a concepção do trabalho até sua finalização. Estendo os agradecimentos à Equipe do LTAD pela disponibilidade durante todo o projeto, partindo da extração de amostras até execução dos ensaios.

A todos os professores e professoras tive o prazer de ver lecionar durante todo o curso de Engenharia Mecatrônica. Obrigado por me incentivarem a ter pensamento crítico e lógico, assim como fomentar a curiosidade.

---

PACHECO, R. M. B. **CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E METALOGRAFICA DE JUNTAS SOLDADAS A LASER PARA APLICAÇÃO EM EQUIPAMENTO AGRÍCOLA.** 2023. 54 f. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

## RESUMO

A soldagem a laser é um processo de união de peças que está em crescente utilização no mercado industrial devido às suas vantagens, como qualidade da junta e redução de massa. Esta solda possui alto potencial para aplicações em maquinários agrícolas por conta do tipo de trabalho e por proporcionar menor compactação de solo. Nesse estudo, foi investigada a influência de três parâmetros de soldagem (materiais de base, potência do laser e velocidade de soldagem) nos valores de dureza máxima, profundidade de penetração, largura do cordão, largura de topo e folgas. Para tanto, foi proposta uma matriz de experimentos com dois fatores, onde a potência variou entre 5000 W a 6000 W e a velocidades no intervalo de 53 mm/min a 63 mm/min. Foram avaliados três tipos de materiais, sendo dois Aços de Ultra Alta Resistência e um Aço de Alta Resistência Conformado a Frio. A ANOVA mostrou que na faixa de valores utilizada nenhum dos fatores de entrada influenciou de forma estatisticamente significativa a dureza máxima na região soldada, nem os valores das folgas. Contudo, a respeito da profundidade de penetração e da largura da região soldada na intersecção das chapas, os resultados apresentaram que apenas a potência influenciou de forma estatisticamente significativa. Ainda, os resultados afirmam que os materiais possuem influência estatística sobre os valores medidos da largura de topo do cordão. Visando a aplicação dos conjuntos em maquinários agrícolas expostos a esforços repetitivos, os resultados de dureza apresentaram que a junta soldada com maior potência (6000 W) e maior velocidade (63 mm/min) será mais resistente à fadiga e conseqüentemente terá uma maior vida útil.

---

*Palavras-Chave: Soldagem a laser. Solda Autógena. Aços de Ultra Alta Resistência. Laser de Fibra. Resistência à fadiga.*

---

PACHECO, R. M. B. **MECHANICAL AND METHALOGRAPHIC CHARACTERIZATION OF LASER WELDED FOR APPLICATION IN AGRICULTURAL EQUIPMENT**. 2023. 54 p. Course Conclusion Project, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG.

### ABSTRACT

Laser welding has been increasingly used as joining process in the industrial market due to its advantages, such as joint quality and mass reduction. This welding process has high potential for applications in agricultural equipment due to the nature of the work and its ability to minimize soil compaction. In this study, the influence of three welding parameters (base materials, laser power and welding speed) on the values of maximum hardness, depth of penetration, bead width, end width and gaps were investigated. For this purpose, an experimental design with three factors was proposed, where the power varied from 5000 W to 6000 W and the speeds ranged from 53 mm/min to 63 mm/min. Three types of materials were evaluated, including two Ultra High Strength Steels and one Cold-Formed High Strength Steel. The ANOVA analysis showed that in the chosen range none of the input factors significantly influenced the hardness variation in the welded region or the gaps between the sheets. However, regarding penetration depth and width of the welded region at the plate intersection, the results indicated that only power had a statistically significant influence. Furthermore, the results suggested that the materials had a statistical influence on the measured values of the bead width. Considering the application of these assemblies in agricultural equipment subjected to repetitive loads, the hardness results indicated that the welded joint with higher power (6000 W) and higher speed (63 mm/min) would be more fatigue-resistant and consequently have a longer service life.

---

*Keywords: Laser Welding. Autogenous Welding. Ultra High Strength Steel. Fiber Laser. Fatigue Resistance.*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> - Características dos Processos de Soldagem (MODENESI, 2012) .....	06
<b>Figura 2.2</b> - Funcionamento de um Laser (IPG, 2018) .....	07
<b>Figura 2.3</b> - Distribuições do feixe de laser (IPG, 2018) .....	08
<b>Figura 2.4</b> - Laser de Fibra (IPG, 2018).....	10
<b>Figura 3.1</b> - Conjunto robô soldador: (a) Motoman YR-S1A020F; (b) cabeçote IPG 3DM3R.....	12
<b>Figura 3.2</b> - Fixação do conjunto na bancada de ensaio .....	12
<b>Figura 3.3</b> - Detalhes do conjunto soldado: tubo de seção quadrada em azul; perfis C em verde; chapa K em amarelo.....	13
<b>Figura 3.4</b> - Peças utilizadas no conjunto: (a) Tubo de seção quadrada; (b) Perfil C; (c) Chapa K .....	14
<b>Figura 3.5</b> - Exemplo de conjunto soldado .....	17
<b>Figura 3.6</b> - Regiões analisadas dos cordões A e C.....	17
<b>Figura 3.7</b> - Máquina de corte por eletroerosão a fio.....	18
<b>Figura 3.8</b> - Regiões de interesse na macrografia .....	19
<b>Figura 4.1</b> - Conjunto P01 – Cordão A: SS .....	22
<b>Figura 4.2</b> - Conjunto P02: (a) Cordão A - SS; (b) Cordão A - 180; (c) Cordão C – SS...	23
<b>Figura 4.3</b> - Conjunto P03: (a) Cordão A - SS; (b) Cordão A - 180; (c) Cordão C – SS...	25
<b>Figura 4.4</b> - Conjunto P04: (a) Cordão A - SS; (b) Cordão A - 180; (c) Cordão C – SS...	26
<b>Figura 4.5</b> - Conjunto P05: (a) Cordão A - SS; (b) Cordão A - 180; (c) Cordão C – SS...	27
<b>Figura 4.6</b> - Conjunto P06: (a) Cordão A - SS; (b) Cordão A - 180; (c) Cordão C – SS...	28
<b>Figura 4.7</b> - Valores das folgas, em $\mu\text{m}$ .....	29
<b>Figura 4.8</b> - Valores de profundidade, em $\mu\text{m}$ .....	30
<b>Figura 4.9</b> - Valores de largura, em $\mu\text{m}$ .....	30
<b>Figura 4.10</b> - Resultados das medições de dureza das juntas Start-Stop dos cordões A...	32
<b>Figura 4.11</b> - Resultados das medições de dureza das juntas 180 dos cordões A.....	33
<b>Figura 4.12</b> - Resultados das medições de dureza das juntas Start Stop dos cordões C...	35
<b>Figura 4.13</b> - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para os valores de dureza HV1 das juntas soldadas variando os materiais, potência do laser e velocidade de soldagem.....	36

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b> - Parâmetros de soldagem .....	15
<b>Tabela 3.2</b> - Matriz de ensaio para realização das soldas .....	15
<b>Tabela 4.1</b> - Concentração de elementos químicos dos aços utilizados. Média e desvio padrão para nível de confiança de 95 % .....	21
<b>Tabela 4.2</b> - Resultados macrografia conjunto P01 .....	23
<b>Tabela 4.3</b> - Resultados macrografia conjunto P02 .....	24
<b>Tabela 4.4</b> - Resultados macrografia conjunto P03 .....	25
<b>Tabela 4.5</b> - Resultados macrografia conjunto P04 .....	26
<b>Tabela 4.6</b> - Resultados macrografia conjunto P05 .....	27
<b>Tabela 4.7</b> - Resultados macrografia conjunto P06 .....	28
<b>Tabela 4.8</b> - Resultados das medições de dureza das juntas <i>Start-Stop</i> dos cordões A... 31	
<b>Tabela 4.9</b> - Resultados das medições de dureza das juntas 180 dos cordões A..... 33	
<b>Tabela 4.10</b> - Resultados das medições de dureza das juntas <i>Start Stop</i> dos cordões C 34	
<b>Tabela 4.11</b> - Resultados de ANOVA para o efeito dos fatores de entrada no valor máximo de dureza .....	36
<b>Tabela 4.12</b> - Resultados de ANOVA para o efeito dos fatores de entrada no valor de profundidade .....	37
<b>Tabela 4.13</b> - Resultados de ANOVA para o efeito dos fatores de entrada no valor de largura de topo .....	37
<b>Tabela 4.14</b> - Resultados de ANOVA para o efeito dos fatores de entrada no valor de largura da intersecção .....	38
<b>Tabela 4.15</b> - Resultados de ANOVA para o efeito dos fatores de entrada nos valores de folga .....	39

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

### Lista de siglas:

ANOVA	Análise de Variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BPP	<i>Beam Parameter Product</i>
CE	Carbono Equivalente
CP	Corpo de Prova
EBW	<i>Electron Beam Welding</i>
GTAW	<i>Gas-Tungsten Arc Welding</i>
GMAW	<i>Gas-Metal arc welding</i>
HV	<i>Vickers Hardness</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LBW	<i>Laser Beam Welding</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
SS	<i>Start Stop</i>
UHSS	<i>Ultra High Strength Steel</i>
YAG	<i>Yttrium Aluminum Garnet</i>
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZTA	Zona Termicamente Afetada

### Lista de símbolos:

$\eta$	Eficiência energética
$\theta$	Meio ângulo de convergência/divergência do laser
$W_{\theta}$	Raio do feixe no ponto focal

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>01</b>
1.1 Objetivo Principal .....	02
1.2 Justificativa .....	02
<b>CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>04</b>
2.1 Metalurgia da Soldagem .....	04
2.2 Processos de Soldagem .....	05
2.3 Luz Amplificada por Emissão Estimulada de Radiação ( <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> ) - LASER .....	06
2.3.1 Laser Nd:YAG .....	08
2.3.2 Laser de CO <sub>2</sub> .....	09
2.3.3 Laser de Fibra .....	09
2.4 Soldagem a Laser .....	10
<b>CAPÍTULO III – METODOLOGIA .....</b>	<b>11</b>
3.1 Procedimento de soldagem .....	11
3.1.1 Materiais .....	13
3.1.2 Parâmetros de soldagem .....	15
3.2 Caracterização dos materiais de base .....	16
3.2.1 Análise da composição química .....	16
3.3 Análise da junta soldada .....	16
3.3.1 Fabricação das amostras .....	18
3.3.2 Análise macrográfica .....	18
3.3.3 Medição de dureza .....	19
3.4 Análise dos resultados .....	19
<b>CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>20</b>
4.1 Resultados da análise de composição química .....	20
4.2 Resultados da análise macrográfica .....	22
4.2.1 Resultados da análise macrográfica do conjunto P01 .....	22
4.2.2 Resultados da análise macrográfica do conjunto P02 .....	23
4.2.3 Resultados da análise macrográfica do conjunto P03 .....	24
4.2.4 Resultados da análise macrográfica do conjunto P04 .....	25
4.2.5 Resultados da análise macrográfica do conjunto P05 .....	26
4.2.6 Resultados da análise macrográfica do conjunto P06 .....	27
4.2.7 Resumo e discussões .....	28

4.3 Resultados da medição de dureza .....	30
4.3.1 Resultados das medições de dureza das juntas Start-Stop dos cordões A .....	31
4.3.2 Resultados das medições de dureza das juntas 180 dos cordões A .....	32
4.3.3 Resultados das medições de dureza das juntas Start-Stop dos cordões C .....	34
4.4 Resultados da ANOVA .....	35
4.4.1 Resultados de ANOVA para os efeitos dos parâmetros de soldagem nos valores de dureza .....	35
4.4.2 Resultados de ANOVA para os efeitos dos parâmetros de soldagem nos valores de profundidade .....	36
4.4.3 Resultados de ANOVA para os efeitos dos parâmetros de soldagem nos valores de largura de topo do cordão .....	37
4.4.4 Resultados de ANOVA para os efeitos dos parâmetros de soldagem nos valores de largura na intersecção das chapas .....	38
4.4.5 Resultados de ANOVA para os efeitos dos parâmetros de soldagem nos valores de folga .....	38
<b>CAPÍTULO V – CONCLUSÃO .....</b>	<b>40</b>
5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....	41
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>42</b>

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem possuem as mais variadas finalidades, como junção de peças, revestimentos e até mesmo correções dimensionais. Podem ser divididos em dois grandes grupos: soldagem por fusão e soldagem por pressão. As soldas por pressão podem ser classificadas em forjamento, explosão e fricção. Já as soldas por fusão são divididas em soldagem a gás, a arco e por feixe de alta energia. Esta ainda pode ser expandida em soldagem por feixe de elétrons (*electron beam welding* – EBW) ou soldagem por feixe de laser (*laser beam welding* – LBW). Esta última será parte do tema deste trabalho.

A soldagem a laser para metais foi desenvolvida na década de 1960, mais especificamente nos Estados Unidos da América. A invenção do feixe de laser remonta a trabalhos do início do século XX, onde os conceitos de emissão espontânea e emissão estimulada são bem conhecidos da teoria de Albert Einstein de 1917 (KLEPPNER, 2005). Avançando historicamente, em 1960 o físico Theodore Harold Maimann, graduado pela Universidade do Colorado e autor do livro “*The Laser Odyssey*” construiu o primeiro laser, um sólido de rubi que seria excitado por uma lâmpada fluorescente de vapor de mercúrio e filamento helicoidal (CABRAL, 2009). Seu laser abriu um leque de opções para aplicações, onde já em 1962 foi utilizado em micro-soldagens para cirurgias de retina. Já nos anos 1970, surgiu a primeira demonstração de soldagem a laser em termoplásticos. Nesta mesma década as primeiras células robotizadas, demonstrando a necessidade de automatização nos processos de soldagem.

A soldagem a laser é um processo muito rápido e eficiente, sendo altamente recomendado para processos automatizados. Pode ser utilizada para criação dos mais variados tipos de juntas, sendo muito aplicável a montagens de difícil acesso, já que pode ser

soldada a certa distância. Sendo assim, para fábricas de maquinário pesado – setor agrícola, por exemplo – a soldagem a laser tem sido levada em consideração.

### **1.1. Objetivo Principal**

O presente trabalho tem por objetivo a caracterização de juntas soldadas a laser envolvendo ensaios mecânicos de micro dureza e análise metalográfica. Tal avaliação abordará a caracterização do metal de base e da Zona Termicamente Afetada (ZTA) de juntas soldadas obtidas utilizando diferentes parâmetros. As juntas soldadas a laser serão fornecidas pela empresa interessada na pesquisa. Sendo foco deste Projeto de Fim de Curso (PFC) apenas a caracterização de juntas soldadas. Para tanto será desenvolvida uma metodologia que visa a utilização de ensaios mecânicos de micro dureza e microscopia ótica e eletrônica. Os dados resultantes dos ensaios serão tratados estatisticamente e analisados visando identificar a combinação mais adequada dos parâmetros da solda a laser para aplicação em equipamentos agrícolas.

Este Projeto de Fim de Curso também se dedica a propor uma metodologia de avaliação das juntas soldadas obtidas por processo laser utilizando ensaios mecânicos, como os citados acima. A intenção é identificar qual é a melhor combinação entre metal de base e parâmetros de soldagem a laser para aplicação em equipamentos agrícolas com base nas propriedades mecânicas extraídas das juntas soldadas avaliadas.

### **1.2. Justificativa**

Os processos de soldagem podem ser vistos como um sistema estocástico com várias entradas e saídas, fato que permite a avaliação e análise de dados. Nesse sentido, a Indústria 4.0, conceito que traz consigo a tomada de decisão baseada na exigência de informações, assim como detecção e prevenção de erros e melhorias nos processos, enxerga grande potencial considerando tecnologias de soldagem (MARTINEZ, 2020).

A soldagem a laser possui grande aporte tecnológico envolvido, sendo assim, esta sai em vantagem na questão de aumento e da qualidade da aquisição de dados referente ao processo em si. Por este motivo a indústria tradicional tem voltado sua atenção para tal processo de soldagem não tão típico.

A construção de uma célula robotizada para soldagem a laser pode atingir valores financeiros consideráveis, mesmo para as companhias mais consolidadas no mercado. Visto isso, o aumento da sua participação nos processos utilizados é gradual. A qualidade está entre as principais justificativas de seu uso, assim como a ausência de um material de adição.

A complexidade de dados adquiridos anda de mãos dadas com o desenvolvimento de técnicas mais eficientes para sua análise, como inteligência artificial e aprendizado de máquina. Com isso, esta análise dos processos de soldagem nada mais é do que uma continuidade no desenvolvimento da interdisciplinaridade necessária para a Indústria 4.0 (MARTINEZ, 2020).

De acordo com relatório publicado pela Grand View Research, o mercado global de produtos de soldagem foi estimado em US\$ 13,49 bilhões no ano de 2021 e possui taxa de crescimento anual composta de 4,4 % avaliada para o intervalo de 2022 a 2030. Com isso, torna-se viável o estudo de técnicas crescentes no ramo industrial.

No ramo agrícola o peso do maquinário possui diferencial competitivo no mercado, por conta da compactação do solo, característica que impede o plantio naquela região de trânsito pesado. Por conta disso, vê-se um aumento da necessidade de redução de massa. Uma alternativa é a utilização de chapas mais finas utilizando aços mais resistentes e consequentemente capazes de suportar a demanda de trabalho. Por outro lado, também é voltada a atenção ao processo de manufatura dos componentes, este muitas vezes soldados por processos mais convencionais, como o *Metal Inert Gas* ou *Metal Active Gas* (MIG/MAG).

Nesse sentido, é justificável encontrar um ponto ótimo entre o material utilizado e o método de soldagem. Portanto, este trabalho tem como base a avaliação de conjuntos soldados a laser, onde se estabeleceu a necessidade de uso de determinados materiais e variou-se parâmetros de soldagem a fim de se obter a melhor união de chapas, pensando no viés industrial.

## **CAPÍTULO II**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1. Metalurgia da Soldagem**

Os processos de soldagem são responsáveis por alterações bem localizadas e repentinas de temperatura nos materiais que serão unidos. Com isso, tais variações térmicas podem ser suficientes para provocar mudanças estruturais, e conseqüentemente, alterar as propriedades do material. Geralmente são alterações que degradam tais propriedades, trazendo certas implicações na sua futura utilização. Uma das maneiras que usualmente é escolhida para se enfrentar tal problema se trata do controle do processo de soldagem, isto é, a execução de operações complementares, como tratamentos térmicos e afins (MODENESI, 2012).

Com isso, a metalurgia da soldagem tem como objetivo avaliar com o processo de solda influencia a estrutura e as propriedades dos materiais. Para isso, se torna necessário a obtenção de informações que no futuro auxiliarão no desenvolvimento de materiais menos susceptíveis. Da mesma maneira, este estudo visa determinar os parâmetros operacionais de soldagem de maior influência nas alterações da estrutura e propriedades do material (MODENESI, 2012).

Dessa maneira, se vê necessária a realização da macrografia da junta soldada. A observação da junta permite que o projetista perceba as 4 zonas dispostas simetricamente. Ao centro da imagem observa-se a Zona Fundida, e como seu próprio nome já diz, é a região onde o metal passa por fusão. Imediatamente após há a Zona de Ligação, envolvendo a Zona Fundida. Em seguida têm-se a Zona Termicamente Afetada – ZTA (ou Zona Afetada pelo Calor – ZAC), que se resume à localidade onde houve modificação microestrutural do material,

afetando suas propriedades. E por fim há a Zona Não-Afetada, referente ao material que não passou por modificações metalúrgicas.

## **2.2. Processos de Soldagem**

Os processos de soldagem podem ser utilizados na união de peças, no revestimento e na restauração de dimensões, por meio de manufatura aditiva. No ato de junção, a soldagem possui vantagens que variam desde integridade estrutural do conjunto até a estanqueidade de montagens, todavia, o aporte térmico envolvido pode degradar propriedades mecânicas.

Industrialmente as tecnologias de soldagem mais utilizadas são a Soldagem a Arco e por Feixe de Alta Energia. A primeira se subdivide principalmente em: Soldagem a arco com eletrodo revestido (Shielded metal arc welding – SMAW), Soldagem TIG (Gas-Tungsten arc welding – GTAW), Soldagem MIG/MAG (Gas-Metal arc welding – GMAW) e etc. Já as soldagens obtidas por meio de feixe de alta energia são: Soldagem por feixe de elétrons (Electron beam welding – EBW) e Soldagem por feixe de laser (Laser beam welding – LBW), esta última é a utilizada nos conjuntos avaliados neste trabalho. A Figura 2.1 mostra de forma resumida os processos exemplificados acima e algumas de suas principais características.

PROCESSO	FONTES DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR OU DE CORTE	OUTRAS CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
Soldagem por eletro-escória	Aquecimento por resistência da escória líquida	Contínua ou alternada	Escória	Automática/Mecanizada. Junta na vertical. Arame alimentado mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco	Soldagem de aço carbono, baixa e alta liga, espessura $\geq 50$ mm. Soldagem de peças de grande espessura, eixos, etc.
Soldagem ao Arco Submerso	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo +	Escória e gases gerados	Automática/mecaniz. ou semi-automática. O arco arde sob uma camada de fluxo granular	Soldagem de aço carbono, baixa e alta liga. Espessura $\geq 10$ mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
Soldagem com Eletrodos Revestidos	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo + ou -	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
Soldagem com Arame Tubular	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral o $\text{CO}_2$	O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro. Automático ou semi-automático	Soldagem de aço carbono com espessura $\geq 1$ mm. Soldagem de chapas
Soldagem MIG/MAG	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Argônio ou Hélio, Argônio + $\text{O}_2$ , Argônio + $\text{CO}_2$ , $\text{CO}_2$	Automática/mecaniz. ou semi-automática. O arame é sólido	Soldagem de aço carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura $\geq 1$ mm. Soldagem de tubos, chapas, etc. Qualquer posição
Soldagem a Plasma	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arco é constrito por um bocal	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5 mm. Passes de raiz
Soldagem TIG	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou misturas destes	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente.	Soldagem de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm. Soldagem de não ferrosos e aços inox. Passe de raiz de soldas em tubulações
Soldagem por Feixe Eletrônico	Feixe eletrônico	Contínua. Alta Tensão. Peça +	Vácuo ( $\approx 10^{-4}$ mm Hg)	Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto.	Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura. Indústria nuclear e aeroespacial.
Soldagem a Laser	Feixe de luz		Argônio ou Hélio	Como acima	Como acima. Corte de materiais não metálicos
Soldagem a Gás	Chama oxi-acetilênica		Gás ( $\text{CO}$ , $\text{H}_2$ , $\text{CO}_2$ , $\text{H}_2\text{O}$ )	Manual. Arame adicionado separadamente	Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro

Figura 2.1 - Características dos Processos de Soldagem (MODENESI, 2012)

### 2.3. Luz Amplificada por Emissão Estimulada de Radiação (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* – LASER)

A palavra Laser remete à expressão “luz amplificada por emissão estimulada de radiação”, já traduzida. Em outras palavras, laser se trata de um feixe de luz emitido em um comprimento de onda muito curto, sendo focalizado em uma região de diâmetro pequeno o suficiente para produzir a fusão do material e conseqüentemente, a solda (KOU S, 2003).

Inicialmente, pode se entender que o laser se trata da conversão de energia elétrica em energia óptica. Para isso, são necessários dois espelhos muito bem alinhados e um material utilizado para amplificar a luz (radiação eletromagnética), este material é chamado de meio de ganho e nele se forma uma onda estacionária que cresce cada vez mais e uma parte desta onda sai pelo espelho frontal.

Há duas maneiras de se produzir o laser, a partir de um estado sólido ou a partir de um gás. O laser de estado sólido é produzido a partir da dopagem de um cristal por elementos de terras raras (também chamados de elementos de transição). Por exemplo, o laser Nd- YAG é

produzido por um cristal de Ítrio-alumínio-granada que recebe dopagem de neodímio. Os cristais Nd-YAG comumente utilizados como meios ativos de ganho por conta de suas vantagens ópticas, como alta homogeneidade óptica e estabilidade (FERRARI, 2008). Já em lasers produzidos por gás, como apresentado na Fig. 2.2, têm-se o laser de CO<sub>2</sub>, onde uma mistura de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> e He é constantemente excitada por eletrodos conectados a uma fonte de energia. Lasers de CO<sub>2</sub> podem atingir energias bem superiores (até 15 kW) quando comparados com lasers de estado sólido (até 6 kW) (KOU S, 2003).

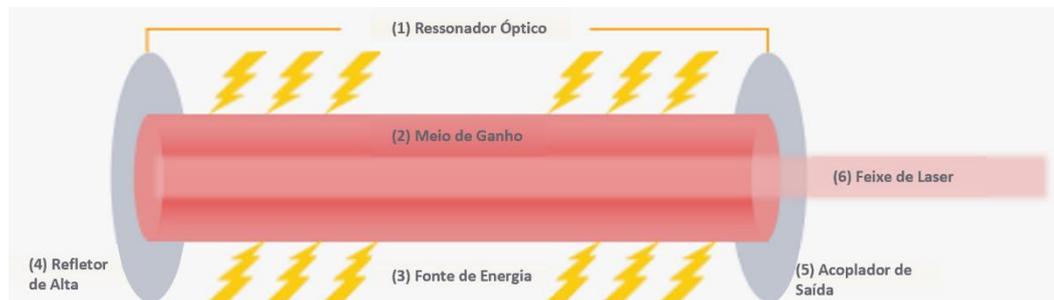


Figura 2.2 - Funcionamento de um Laser (IPG, 2022).

Os lasers podem ser classificados de diversas formas, mas usualmente há a primeira divisão remetente à forma de aplicação da energia, podendo ser pulsada ou contínua. Esta última, como já sugerido, se trata de uma emissão contínua do feixe, sempre no mesmo nível de potência. Esse tipo de laser é muito utilizado na indústria para processos de soldagem e corte. Já o laser pulsado é produzido a partir de pulsos, ou seja, a potência instantânea é maior que a potência média ou nominal. Uma grande área de estudo sobre esse tipo de laser visa aprimorar o controle do tipo do pulso, assim como seu intervalo entre picos. Há lasers capazes de pulsar na faixa de femtossegundos ( $10^{-15}$  s), para fins de comparação, as vibrações moleculares possuem duração de picossegundos ( $10^{-12}$  s), essa frequência alta permite aplicações onde o aporte térmico deve ser controlado. Os lasers pulsados são aplicados majoritariamente para gravação e limpeza de superfícies. Importante ressaltar que quanto maior a potência do laser, maior sua taxa de processamento.

Outro fator importante é a qualidade de feixe, que se trata da inferência no formato ou forma de como a potência do laser é distribuída na seção transversal do feixe. Duas formas apresentadas pela Fig. 2.3 são mais comuns, sendo a Distribuição Gaussiana, que permite um aquecimento mais intenso no centro do feixe, e a Distribuição Uniforme, que gera um perfil uniforme.

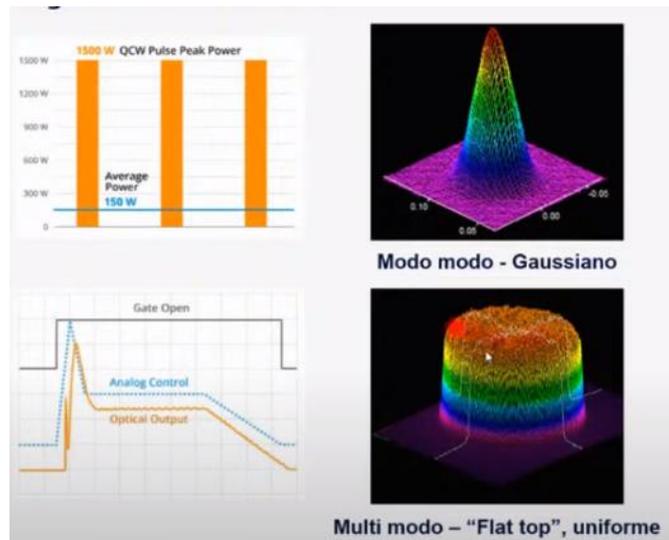


Figura 2.3 - Distribuições do feixe de laser (IPG, 2022).

Uma forma de caracterizar a qualidade de feixe é através do Parâmetro de Produto do Feixe (*Beam Parameter Product* - BPP). O BPP é constante para determinado laser e se trata do produto entre o meio ângulo de convergência/divergência do laser ( $\theta$ ) e o raio do feixe no ponto focal ( $W_\phi$ ). Conforme mostra a Eq. (2.1).

$$BPP = W_\phi \cdot \theta \quad (2.1)$$

Como BPP é constante, caso o feixe possua diâmetro pequeno haverá um grande ângulo de divergência e vice-versa. Também é considerado que quanto menor o valor de BPP maior a qualidade de feixe no ponto focal.

### 2.3.1. Laser Nd:YAG

O laser Nd:YAG é formado por um bastão cilíndrico de Granada de Alumina e Ítria (*Yttrium Aluminum Garnet* – YAG), dopada com Neodímio (Nd). Sendo este um material óxido sintético transparente.

Referente ao seu uso, se trata de um laser com alto consumo elétrico. Caso seja bombeado por lâmpadas, sua eficiência energética ( $\eta$ ) será de 2 % a 3 %. Caso seja bombeado por diodos, esta eficiência possui magnitude de aproximadamente 15 %, ainda baixa para a aplicação. O comprimento de onda deste laser é da ordem de 1060 nm, o que é chamado no mercado de infravermelho próximo.

Sua condução até o cabeçote de aplicação deve ser feita por espelhos ou fibra óptica. Devido às suas limitações, seu uso se restringe a aplicações de baixa produtividade, também associado ao alto custo de manutenção.

### 2.3.2. *Laser de CO<sub>2</sub>*

O laser de CO<sub>2</sub> se trata de uma mistura de 3 gases, como já mencionado. O gás Hélio possui função na condução térmica, mais especificamente responsável por refrigerar o meio onde o laser é produzido. O Nitrogênio é utilizado para excitar o Dióxido de Carbono, que por sua vez atua como meio de ganho.

Sua eficiência energética também não é muito vantajosa industrialmente, já que gira em torno de 10 % a 15 %. Já seu comprimento de onda pode ser considerado na faixa do infravermelho distante, com magnitude de 10600 nm.

Na sua aplicação, sua condução é feita através de espelhos, o que torna seu uso restrito devido à necessidade da precisão do alinhamento destes. Com isso, seu uso se restringe a cortes, seja de polímeros, madeiras e até outros materiais isolantes.

### 2.3.3. *Laser de Fibra*

As fibras ópticas são utilizadas como meio condutor do feixe de laser, desde sua geração até o cabeçote de aplicação. Basicamente são compostas por dois vidros com diferentes índices de refração, sendo o núcleo (*core*) e a casca (*cladding*). Congruente a isso, há o Laser de Fibra, onde a própria fibra óptica que é formada por Dióxido de Silício (SiO<sub>2</sub>) e dopada com Itérbio (Yb) se torna o meio de ganho, como ilustrado pela Fig. 2.4. Sua vantagem primordial é a eficiência durante a extração de calor, por conta de sua baixa espessura. Com isso, é permitido que estes lasers atinjam potências muito elevadas, ainda que em um comprimento de onda no infravermelho próximo, o qual possui boa absorção em metais.

Sua eficiência energética atinge níveis na faixa de 40 % a 50 %, produzindo feixes de alta qualidade. Outra vantagem óbvia é a ausência da necessidade de espelhos para propagação.

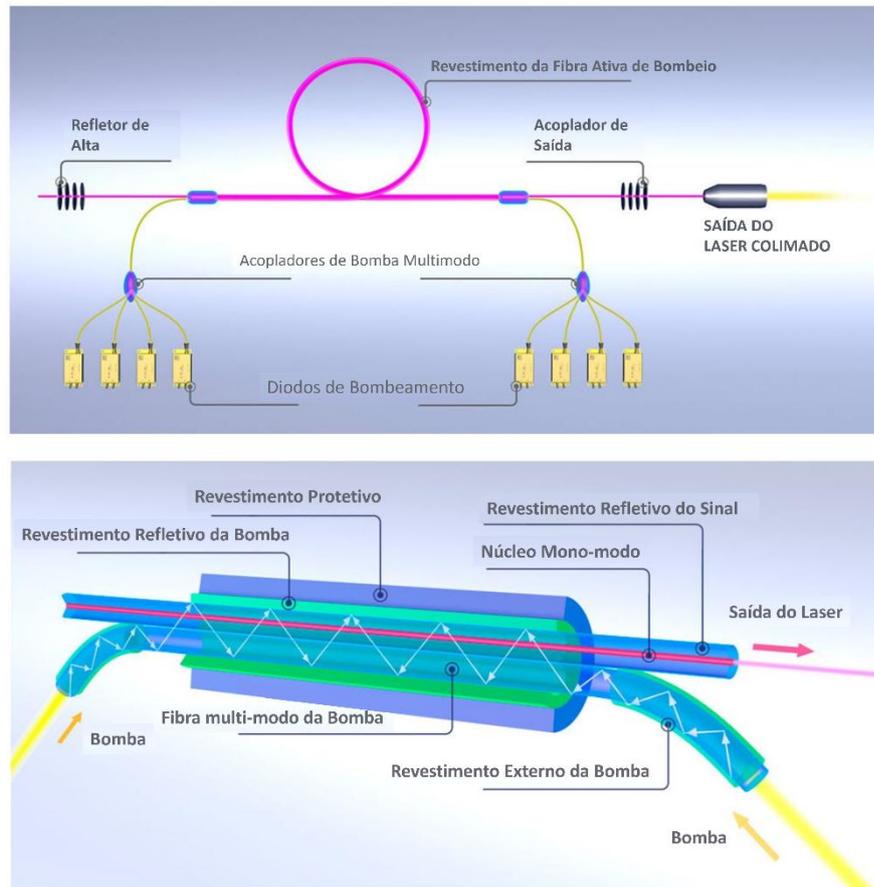


Figura 2.4 - Laser de Fibra (IPG, 2018).

## 2.4. Soldagem a Laser

A soldagem a laser, na maioria dos casos, é considerada uma espécie de soldagem autógena, onde não há adição de material. Ou seja, é um processo de soldagem por fusão do metal base, com um aporte térmico produzido pelo feixe de laser a fim de fornecer a energia necessária para atingir a fusão localizada e produzir a união entre as partes (FREITAS, 2022).

O laser produzido, seja pelo gás ou pelo cristal, é conduzido por uma fibra óptica que não possui função além de conduzi-lo, quando não se trata de um laser produzido por fibra. No cabeçote de processamento – posicionado ao ar livre – há a lente especial utilizada para focalizar o laser na região desejada a ser soldada. Como citado, a focalização gera um aporte térmico muito intenso fazendo com que a região sofra fusão, ocasionando a solda. Este processo é capaz de atingir altas penetrações. Também é conhecido que tal fenômeno possui rápido resfriamento em virtude da concentração da aplicação de energia, por conta disso há distorção térmica é diminuta.

# CAPÍTULO III

## METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentada a metodologia proposta para a caracterização mecânica e metalográfica de juntas soldadas a laser para aplicação em equipamento agrícola. Para tanto foram propostas as seguintes etapas: descrição do processo de soldagem ao qual os conjuntos foram submetidos e os parâmetros definidos para cada um deles; avaliação das juntas em relação à composição química dos materiais utilizados com o intuito de identificar os aços que compõem os conjuntos, seguido de uma análise macrográfica da junta com o intuito de visualizar aspectos gerais da solda e por fim um ensaio de microdureza em perfil linear, utilizando as técnicas adequadas. Por fim a análise de variância – ANOVA foi aplicada visando investigar o efeito dos parâmetros de solda (material, potência e velocidade) na qualidade da solda (dureza e macrografia).

### 3.1. Procedimento de soldagem

Os conjuntos foram soldados por meio de processo de solda a laser. Este processo não utiliza material de adição, ou seja, é uma solda autógena. Para cada conjunto foram realizados três cordões ovais, por meio de uma célula robótica composta por um robô fabricado pela Yaskawa Motoman, modelo S1A20F, tipo YR-S1A020F-A00, conforme mostrado pela Fig. 3.1. Este robô possui força máxima no elemento atuador de 20 kg e foi fabricado no Japão. Para o direcionamento do laser utilizou-se um cabeçote da fabricante IPG Photonics, modelo 3DM3R.

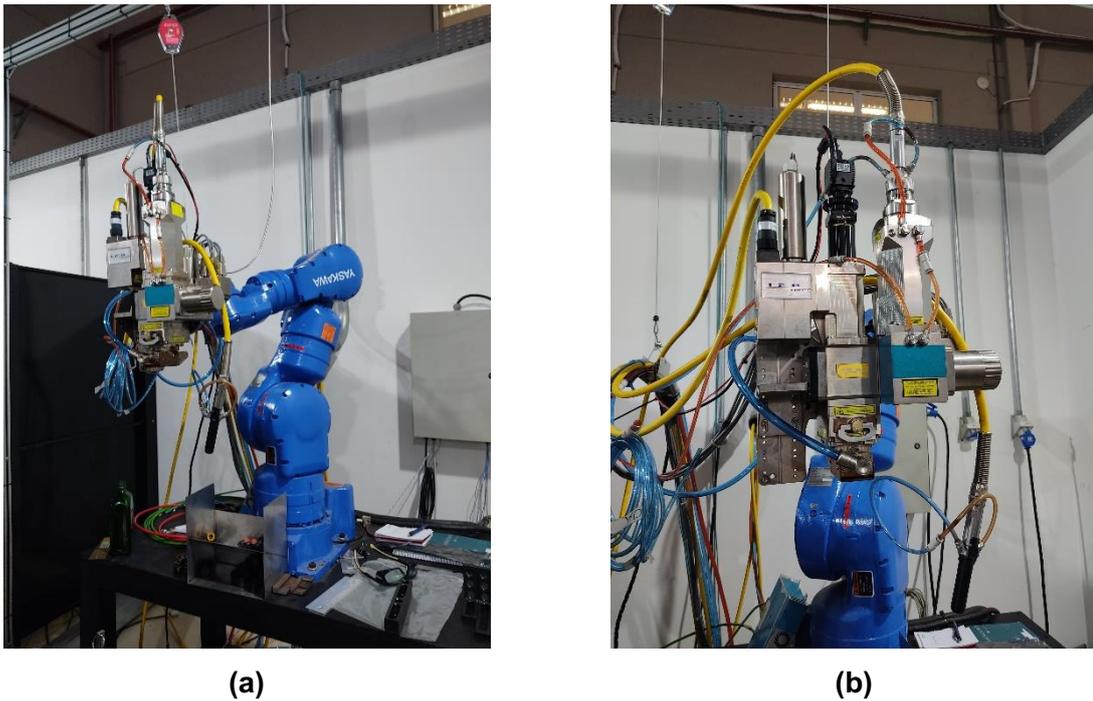


Figura 3.1 – Conjunto robô soldador: (a) Motoman YR-S1A020F; (b) cabeçote IPG 3DM3R.

Inicialmente as peças foram posicionadas na bancada de ensaio e fixadas por meio de grampos, como ilustrado pela Fig. 3.2. Com o posicionamento finalizado, o conjunto foi ponteadado a fim de manter sua geometria e possibilitar a remoção dos elementos fixadores. Com o auxílio de um calibrador de folga (conhecido por *feeler gauge*) de 1 mm verificou-se a folga entre as chapas sendo metade das suas respectivas espessuras, que por sua vez é de 2 mm cada. Durante todos os processos de solda houve supressão de pluma manual.

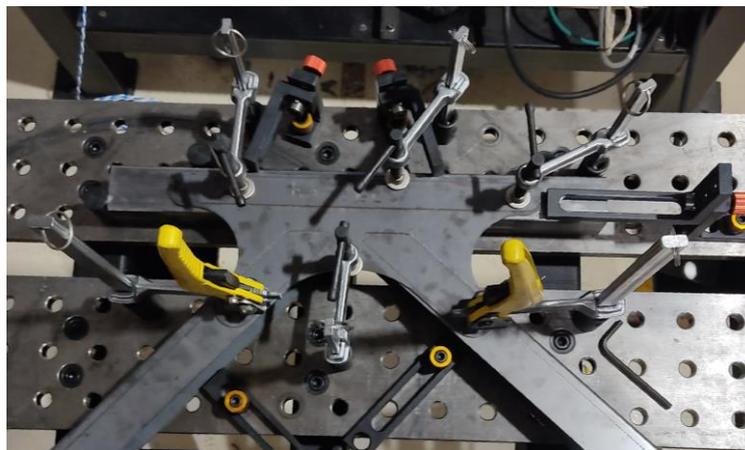


Figura 3.2 – Fixação do conjunto na bancada de ensaio.

### 3.1.1. Materiais

Os conjuntos soldados são utilizados em maquinário agrícola na área de cuidado de colheita (*crop care*). São compostos por quatro componentes estruturais sendo três peças distintas, cita-se um tubo de seção transversal quadrada (50 mm x 50 mm), dois perfis C e uma chapa K. A Figura 3.3 apresenta uma modelagem 3D criada pelo *software* CreoView® 8.1.

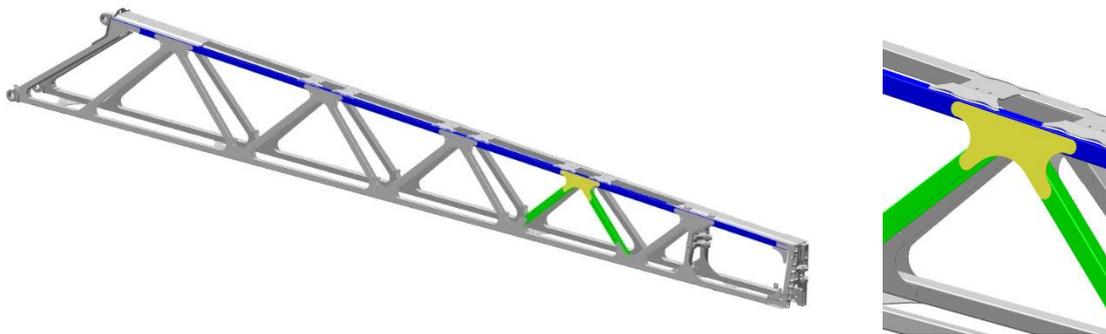
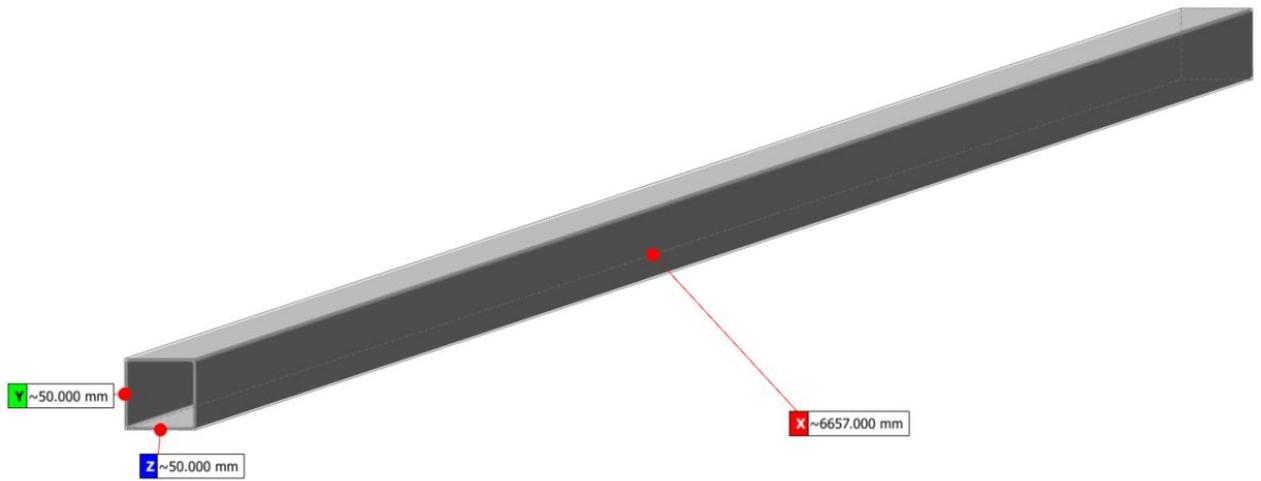


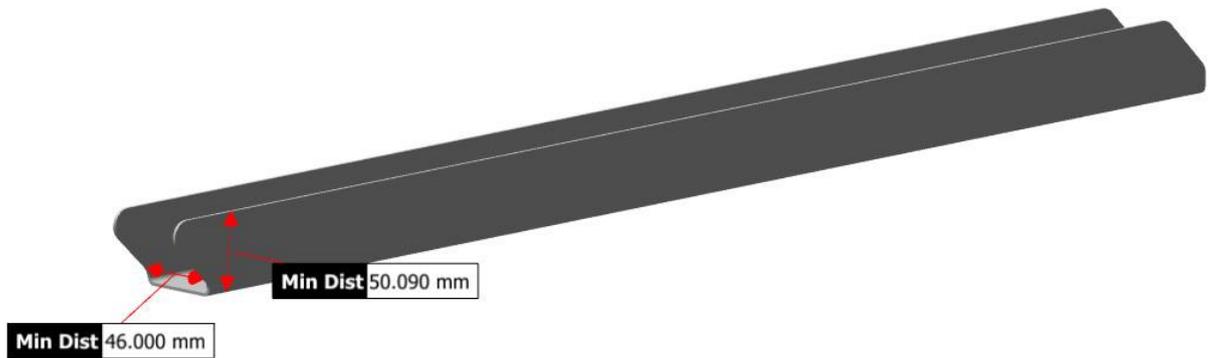
Figura 3.3 – Detalhes do conjunto soldado: tubo de seção quadrada em azul; perfis C em verde; chapa K em amarelo.

Como observado acima, a chapa K possui a função de unir o tubo de seção quadrada aos dois perfis C, funcionando como um nó em uma treliça. Com a finalidade de manter o conjunto conciso, foram realizados três cordões de solda. Sabe-se que cada componente é composto por um aço específico, definidos como Q, C e K respectivamente. Para isso, cada aço será avaliado de acordo com seu comportamento mediante a parametrização da solda.

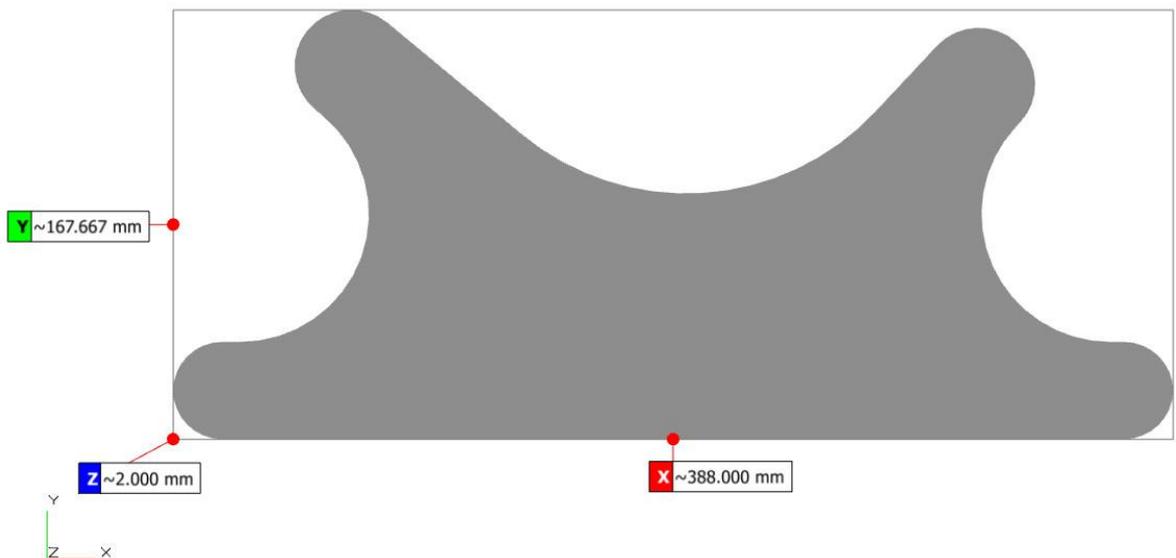
A Figura 3.4 apresenta os componentes do conjunto soldado em separado com algumas dimensões pertinentes, também criada através do *software* CreoView® 8.1.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.4 – Peças utilizadas no conjunto: (a) Tubo quadrado; (b) Perfil C; (c) Chapa K.

### 3.1.2. Parâmetros de soldagem

O programa supervisorio, *Wobbler Controller*, fornecido pela fabricante do cabeçote laser, permite o controle de certos parâmetros de soldagem, desta forma, a Tab. 3.1 mostra quais foram fixados em um valor conhecido pré-determinado e quais foram variados entre os conjuntos soldados, para análise de seus respectivos efeitos na junta soldada.

Tabela 3.1 – Parâmetros de soldagem

Parâmetro	Tipo Definido	Grandeza
Diâmetro do Feixe	Fixado	0,66 mm
Diâmetro da Fibra	Fixado	200 $\mu$ m
Distância de Trabalho	Fixado	447 mm
Foco da Lente	Fixado	500 mm
<i>Wobble</i> - Padrão Circular	Fixado	200 Hz
<i>Wobble</i> – Amplitude de Oscilação	Fixado	0,5 mm
Velocidade de Solda	Variável	53 a 63 mm/min
Potência do Laser	Variável	5000 a 6000 W

Complementar à Tab. 3.1, a matriz de ensaio é apresentada pela Tab. 3.2, onde são apresentados os valores definidos no controlador para cada um dos conjuntos obtidos. Os conjuntos foram soldados na mesma ordem que são apresentados e os valores de potência e velocidade foram escolhidos de modo empírico, observando o comportamento geral da solda, como quantidade de respingos, dilatação das chapas e aspecto visual do cordão. Destaca-se que todos os conjuntos são compostos pelos três tipos de aços já mencionados.

Tabela 3.2 – Matriz de ensaio para realização das soldas

	Potência [W]	Velocidade [mm/min]
P01	5000	63
P02	5500	63
P03	5750	63
P04	6000	63
P05	5750	53
P06	5750	58

### **3.2. Caracterização dos materiais de base**

Os materiais de base foram caracterizados por meio de análise de composição química. Esta etapa se faz necessária para avaliação das propriedades mecânicas finais da solda, uma vez que são dependentes não só dos parâmetros de soldagem, mas também da composição química dos metais de base. Além disso, por meio desta caracterização será possível avaliar a soldabilidade dos materiais utilizados.

#### *3.2.1. Análise da composição química*

A análise de composição química dos elementos de liga dos três materiais utilizados foi realizada com o espectrômetro da fabricante LECO, modelo GDS 500, com resolução de 0,0001 % de peso, com funcionamento a partir de emissão óptica por descarga luminescente. Para tanto uma amostra foi retirada de cada peça. A superfície de teste da amostra foi retificada por meio de uma retífica Yadoya RG-280 com rotação máxima de 3400 rpm e rebolo do tipo copo reto AA46k6V com dimensões 177,8 x 76,2 x 76,2 mm<sup>3</sup>. Posteriormente passou pelo procedimento de lixamento manual com lixa abrasiva Sic de 220 *mesh* e água como lubrificante. Foi realizada apenas uma queima, e três valores de composição química foram coletados.

### **3.3. Análise da junta soldada**

Para análise das juntas soldadas, definiu-se a nomenclatura de todos os cordões executados, sendo três por condição. Para isso, foram nomeados os cordões A, B e C, sendo o primeiro executando a união entre a chapa K superior e o tubo de seção quadrada e os dois últimos unindo a chapa K superior e os dois perfis C, como apresentado no exemplo do conjunto soldado P01 ilustrado pela Fig. 3.5. Ademais, considerando a análise dos efeitos das variações dos parâmetros de solda para os diferentes materiais e somando a isso o fato dos cordões B e C serem iguais, em parametrização e material, utilizou-se somente os cordões A e B para as análises a seguir.



Figura 3.5 – Exemplo de conjunto soldado

Para os cordões identificados com a letra A foram analisadas duas regiões diferentes. Definiu-se como região de interesse a região onde o laser atinge a peça e executa o cordão em um passo só, sendo então a mesma região onde se encerra o cordão. Essa região é chamada de *Start-Stop* (SS). Também se analisou a região onde o laser está  $180^\circ$  em relação à região anterior, ou seja, uma região de soldagem contínua na direção oposta. Contudo, para os cordões identificados com a letra B apenas a região *Start-Stop* foi analisada. A Figura 3.6 mostra as regiões onde as amostras foram retiradas, utilizando como exemplo o conjunto P03 e seus respectivos cordões S03A e S03C, assim como o sentido anti-horário de soldagem.



Figura 3.6 – Regiões analisadas dos cordões A e C

### 3.3.1 *Fabricação das amostras*

As amostras foram retiradas por meio da máquina de corte por eletroerosão a fio modelo FW 2U, do fabricante Agie Charmilles, com condução mecânica motorizada ilustrada pela Fig. 3.7.



Figura 3.7 – Máquina de corte por eletroerosão a fio.

Após o processamento via eletroerosão a fio, as amostras foram embutidas em baquelite, retificadas e lixadas utilizando uma lixadeira manual da fabricante Arotec, modelo Aeropol E. O processo de retificação se deu utilizando a retífica Yadoya modelo RG-280. Durante o lixamento foram utilizadas lixas abrasivas SiC de 220, 600 e 1200 *mesh* e água como lubrificante. Posteriormente, foi realizado o polimento com pastas de diamante com granulometrias médias de 9  $\mu\text{m}$ , 6  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ , em uma politriz manual Arotec, modelo E. O acabamento foi obtido por polimento com sílica coloidal.

Após a preparação das amostras, foi realizado um ataque químico para a revelação das regiões da junta soldada, utilizando Nital 2 %, por aproximadamente dez segundos.

### 3.3.2 *Análise macrográfica*

As análises macrográficas das juntas soldadas foram realizadas utilizando microscopia óptica. Para tanto, foi utilizado o microscópio óptico da marca Olympus, modelo BX51M, equipado com câmera para aquisição de imagens.

Ainda durante as análises macrográficas, foram realizadas medições das regiões de interesse da junta soldada. Podem ser citadas as dimensões mensuradas, como apresentadas na Fig. 3.8: largura do cordão no topo (Lt), largura do cordão na intersecção entre as chapas (Lm), profundidade de penetração (P) e folgas laterais.

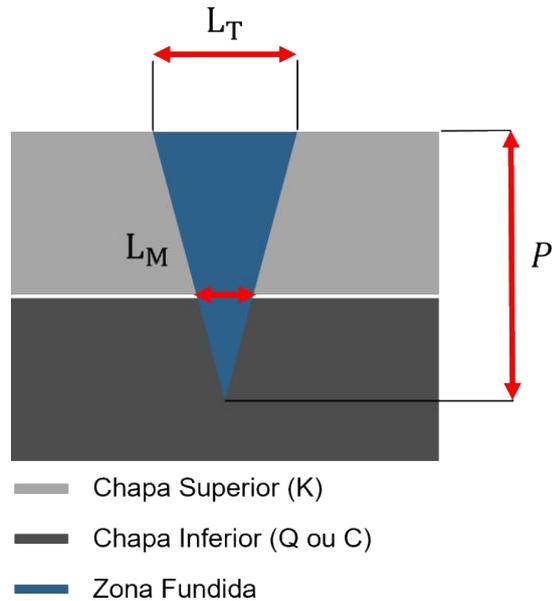


Figura 3.8 – Regiões de interesse na macrografia.

### 3.3.3 Medição de dureza

A medição do perfil de dureza foi realizada ao longo da junta soldada das amostras, contemplando o metal de base e as regiões afetadas pela solda. Para tanto, a dureza Vickers foi medida utilizando um durômetro Struers, modelo Duramin-40, com resolução de 0,01 HV1.

A medição foi efetuada a temperatura ambiente de 20 °C, utilizando força de 1 kgf e tempo de aplicação (*dwell time*) de 10 segundos. O perfil foi composto por 16 pontos espaçados de 0,2 mm entre eles, de acordo com as determinações da norma ASTM E92 (ASTM, 2017). Para cada amostra, um perfil de dureza foi realizado no meio da espessura da chapa superior.

## 3.4. Análise dos resultados

Os resultados de composição foram analisados utilizando estatística básica (cálculo da média e do desvio padrão). Em relação aos resultados das macrografias e dos perfis de dureza, foi utilizada a análise de variância ANOVA. Esta última foi aplicada utilizando o *software* STATISTICA e teve como finalidade investigar o efeito dos parâmetros de solda (potência e velocidade) na qualidade da solda (dureza e macrografia).

# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e suas respectivas discussões. Inicialmente são apresentados os resultados decorrentes da análise de composição química dos três materiais de base, em seguida os resultados das macrografias das juntas soldadas, avaliando suas regiões de interesse. Os valores do perfil linear de dureza serão apresentados posteriormente e por fim os resultados da ANOVA.

### 4.1. Resultados da análise de composição química

A Tabela 4.1 mostra os resultados da análise de composição química dos três materiais de base. Os valores mostram a média de três leituras em porcentagem em peso de cada elemento e o desvio padrão associado para uma confiança de 95 %.

Observando a Tabela 4.1, é possível verificar que os materiais C e K possuem relevante semelhança, destacando diferenças apenas nos teores dos elementos silício e cromo. Sendo assim, de acordo com a norma ASTM A1011 (ASTM, 2018) estes podem ser classificados como aços de ultra alta resistência, do inglês *Ultra High Strength Steel* – UHSS. Ainda de acordo com a norma, estes materiais possuem limite de escoamento de 690 MPa.

Em relação ao aço Q, de acordo com a norma ASTM A1112 (ASTM, 2018), pode ser classificado como aço de alta resistência conformado a frio, do inglês *Cold Formed High Strength Carbon Steel*. Seu limite de escoamento indicado é de 485 MPa. Vale destacar que a citada norma faz a diferenciação entre tubos costurados e extrudados. A primeira opção, referente ao tubo utilizado nos conjuntos apresentados neste trabalho, se refere a tubos

originados a partir de uma chapa de metal plana, que são conformados em seção quadrada e soldados ao longo da junta longitudinal.

Tabela 4.1 – Concentração de elementos químicos dos aços utilizados. Média e desvio padrão para nível de confiança de 95 %

Elemento (% de peso)	Material		
	C	K	Q
<b>C</b>	0,0797 ± 0,0004	0,0963 ± 0,0012	0,1420 ± 0,0000
<b>Mn</b>	1,6500 ± 0,0000	1,6800 ± 0,0000	1,4500 ± 0,0000
<b>Si</b>	0,3253 ± 0,0023	0,0518 ± 0,0007	0,2170 ± 0,0017
<b>P</b>	0,0172 ± 0,0006	0,0160 ± 0,0001	0,0121 ± 0,0008
<b>S</b>	0,0021 ± 0,0007	0,0028 ± 0,0006	0,0009 ± 0,0005
<b>Cr</b>	0,0245 ± 0,0003	0,5357 ± 0,0015	0,0633 ± 0,0006
<b>Ni</b>	0,0104 ± 0,0023	0,0165 ± 0,0033	0,0653 ± 0,0015
<b>Mo</b>	0,0046 ± 0,0001	0,0038 ± 0,0008	0,0207 ± 0,0003
<b>Al</b>	0,0405 ± 0,0002	0,0284 ± 0,0002	0,0371 ± 0,0001
<b>Cu</b>	0,0100 ± 0,0005	0,0289 ± 0,0003	0,0101 ± 0,0005
<b>Ti</b>	0,0918 ± 0,0010	0,0990 ± 0,0005	0,0073 ± 0,0005
<b>W</b>	0,0141 ± 0,0016	0,0224 ± 0,0020	0,0000 ± 0,0000
<b>V</b>	0,0008 ± 0,0003	0,0020 ± 0,0001	0,0084 ± 0,0003
<b>Nb</b>	0,0421 ± 0,0007	0,0562 ± 0,0006	0,0133 ± 0,0002
<b>B</b>	0,0006 ± 0,0001	0,0006 ± 0,0001	0,0007 ± 0,0001

Ainda de acordo com a norma ASTM A1112 (ASTM, 2018), o carbono equivalente (CE) permitido para esse material não deve exceder 0,45 %, e pode ser calculado segundo a Eq. (4.1).

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (4.1)$$

Substituindo os valores médios apresentados pela Tab. 4.1, têm-se o valor de CE igual a 0,4072 %, atendendo assim a normativa vigente.

#### 4.2. Resultados da análise macrográfica

Nesta seção serão apresentadas as macrografias obtidas das juntas soldadas. Foram analisadas três seções transversais por conjunto, sendo duas (*Start Stop* – SS e 180) do mesmo cordão unindo a chapa K e o tubo de seção quadrada Q e uma (*Start Stop* – SS) representando o cordão unindo a chapa K e perfil C, que foram identificados como componentes do mesmo material. Serão apresentadas as macrografias das três regiões de cada conjunto e suas respectivas medidas.

##### 4.2.1. Resultados da análise macrográfica do conjunto P01

O conjunto P01 recebeu a parametrização inicial dos ensaios, conforme a Tab. 3.2, sendo a potência de 5000 W e a velocidade de 63 mm/min. Dessa maneira, foi possível verificar que não houve penetração necessária para proporcionar a união das peças. Sendo assim, para este conjunto em específico, apresenta-se apenas uma macrografia obtida da região de SS do cordão A, ilustrada pela Fig. 4.1.

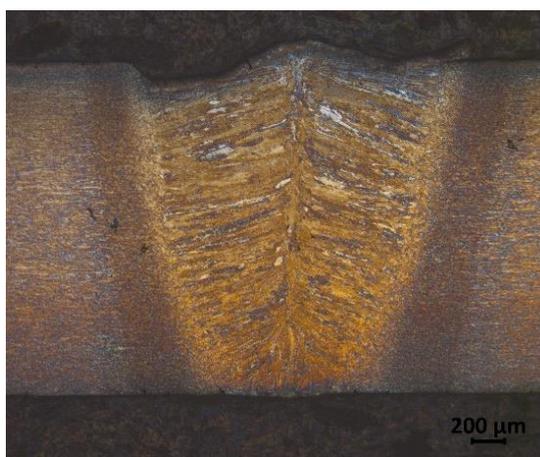


Figura 4.1 – Conjunto P01 – Cordão A: SS

A Tabela 4.2 apresenta os valores, em  $\mu\text{m}$ , obtidos para a macrografia apresentada acima. As medições foram realizadas por meio do microscópio óptico da marca Olympus,

modelo BX51M, o mesmo utilizado para aquisição da Fig. 4.1, para tanto somente uma medição foi realizada

Tabela 4.2 – Resultados macrografia conjunto P01

Solda	Profundidade [μm]	Largura Topo [μm]	Largura Meio [μm]	Folga [μm]	
S01A-SS	-	1955,460	1072,260	-	-

#### 4.2.2. Resultados da análise macrográfica do conjunto P02

Para o conjunto P02 houve o acréscimo de 10 % na potência do laser, sendo aplicados 5500 W, ainda em uma velocidade de 63 mm/min. Com este leve incremento foi possível realizar a união das peças das regiões de SS de ambos os cordões. Contudo, ainda não houve penetração suficiente na região de solda contínua para o cordão A. A Figura 4.2 apresenta as macrografias das três seções transversais analisadas.

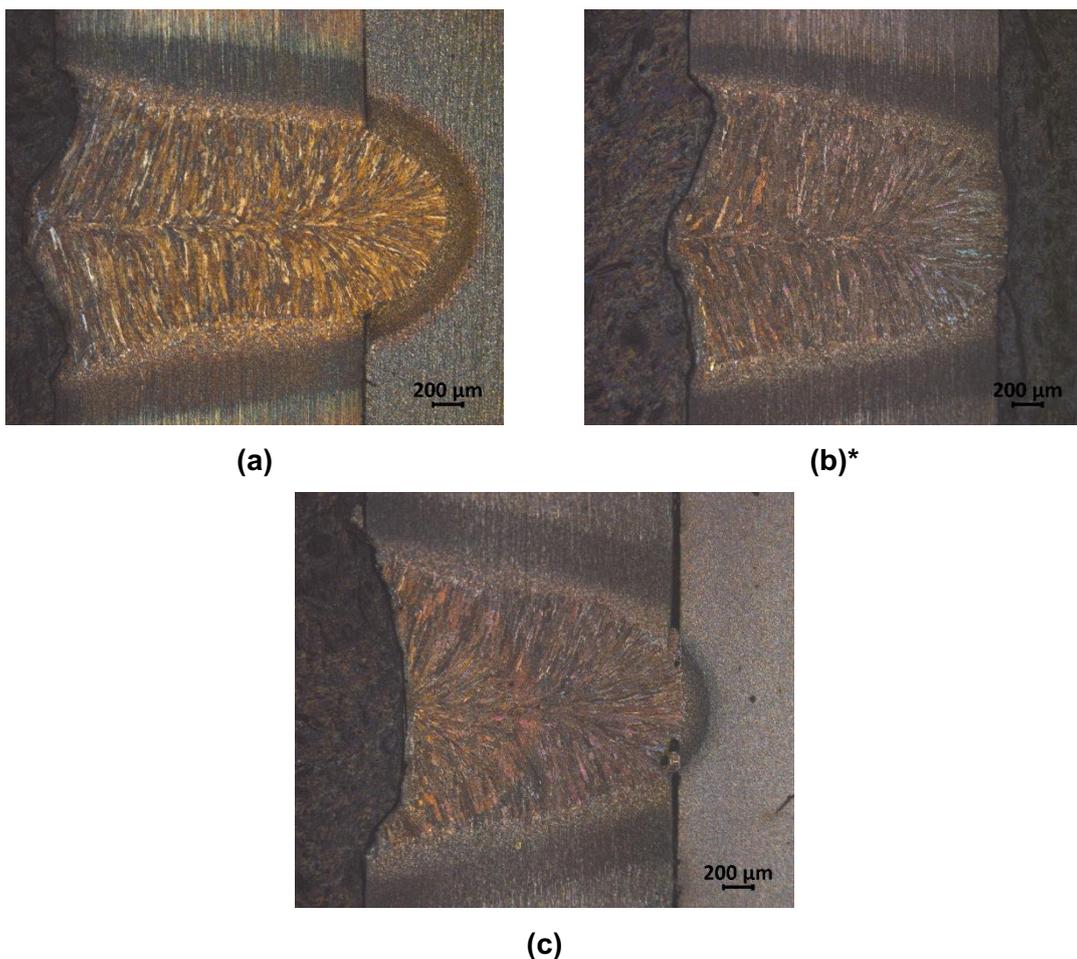


Figura 4.2 – Conjunto P02: (a) Cordão A - SS; (b) Cordão A - 180; (c) Cordão C – SS.

\* - Cordão S02A-180 sem união de peças, penetração insuficiente.

A Tabela 4.3 apresenta os valores adquiridos durante a análise macrográfica do conjunto P02.

Tabela 4.3 – Resultados macrografia conjunto P02

<b>Solda</b>	<b>Profundidade [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Largura Topo [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Largura Meio [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Folga [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	
S02A-SS	2657,880	2096,220	1262,700	17,940	16,560
S02A-180	2162,460	2093,460	974,280	-	-
S02C-SS	2093,460	2183,160	840,420	60,552	41,378

#### 4.2.3. Resultados da análise macrográfica do conjunto P03

Para o conjunto P03 foi mantida a mesma estratégia em relação ao conjunto anterior, isto é, houve um aumento da potência do laser, sendo mantida a velocidade de 63 mm/min. Contudo, o aumento foi a metade, 5 %, do valor inicial. Assim, para o conjunto P03, conforme Tab. 3.2, utilizou-se a 5750 W.

A partir deste conjunto todos os cordões apresentaram energia de soldagem suficiente para garantir a união das peças. Ainda, foi possível observar um aumento quantitativo de respingos. A Figura 4.3 apresenta as macrografias para este conjunto.

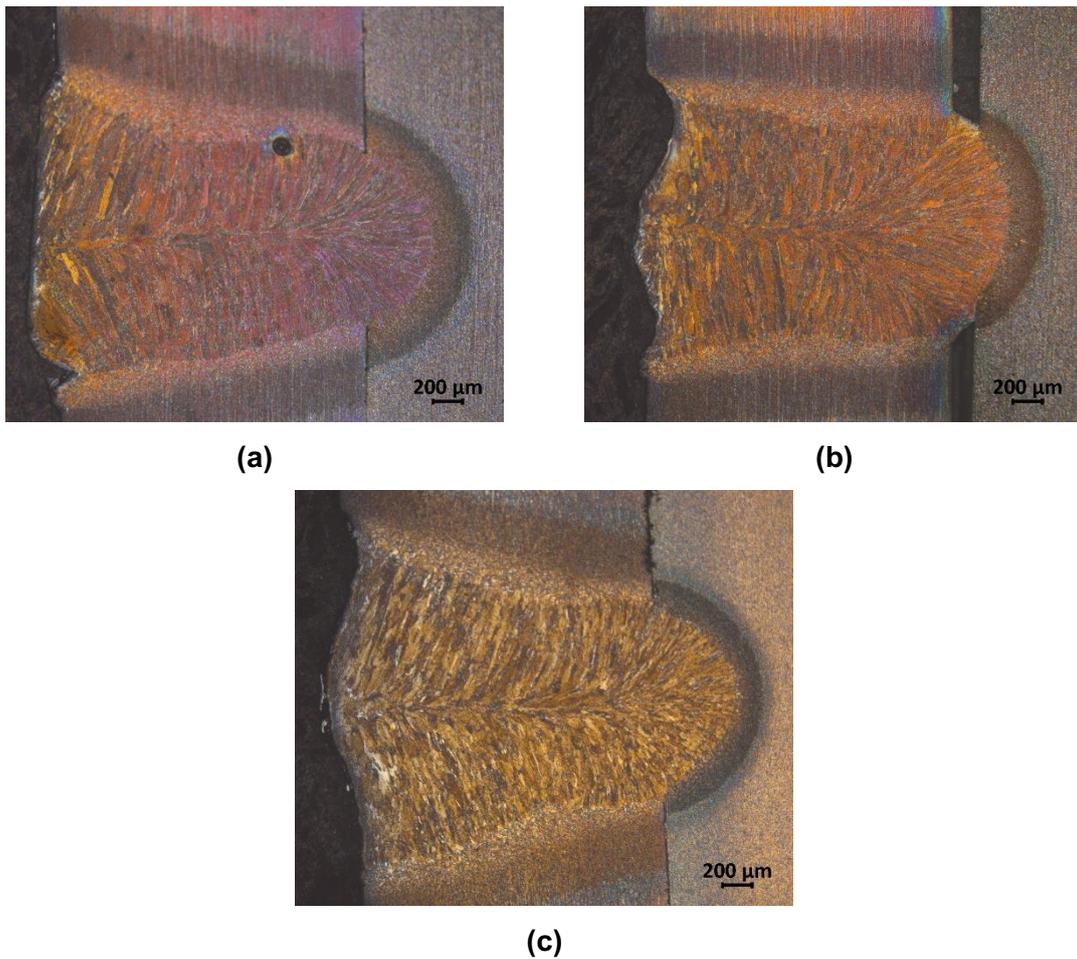


Figura 4.3 – Conjunto P03: (a) Cordão A - SS; (b) Cordão A - 180; (c) Cordão C – SS.

Tabela 4.4 – Resultados macrografia conjunto P03

Solda	Profundidade [µm]	Largura Topo [µm]	Largura Meio [µm]	Folga [µm]	
S03A-SS	2534,128	2115,540	1163,340	15,180	17,765
S03A-180	2466,060	1998,240	1403,460	175,260	146,280
S03C-SS	2689,620	2328,060	1345,500	12,420	10,846

#### 4.2.4. Resultados da análise macrográfica do conjunto P04

De acordo com a Tab. 3.2, o conjunto P04 foi aquele com a maior potência de laser aplicada às peças, sendo 6000 W. Entretanto a velocidade se manteve na casa de 63 mm/min. Vale destacar que este conjunto apresentou aumento intenso de respingos, fator determinante para a decisão de limitar a potência a 6000 W. Destaca-se que não houve penetração total. Com isso, a Fig. 4.4 ilustra os fatores acima mencionados.

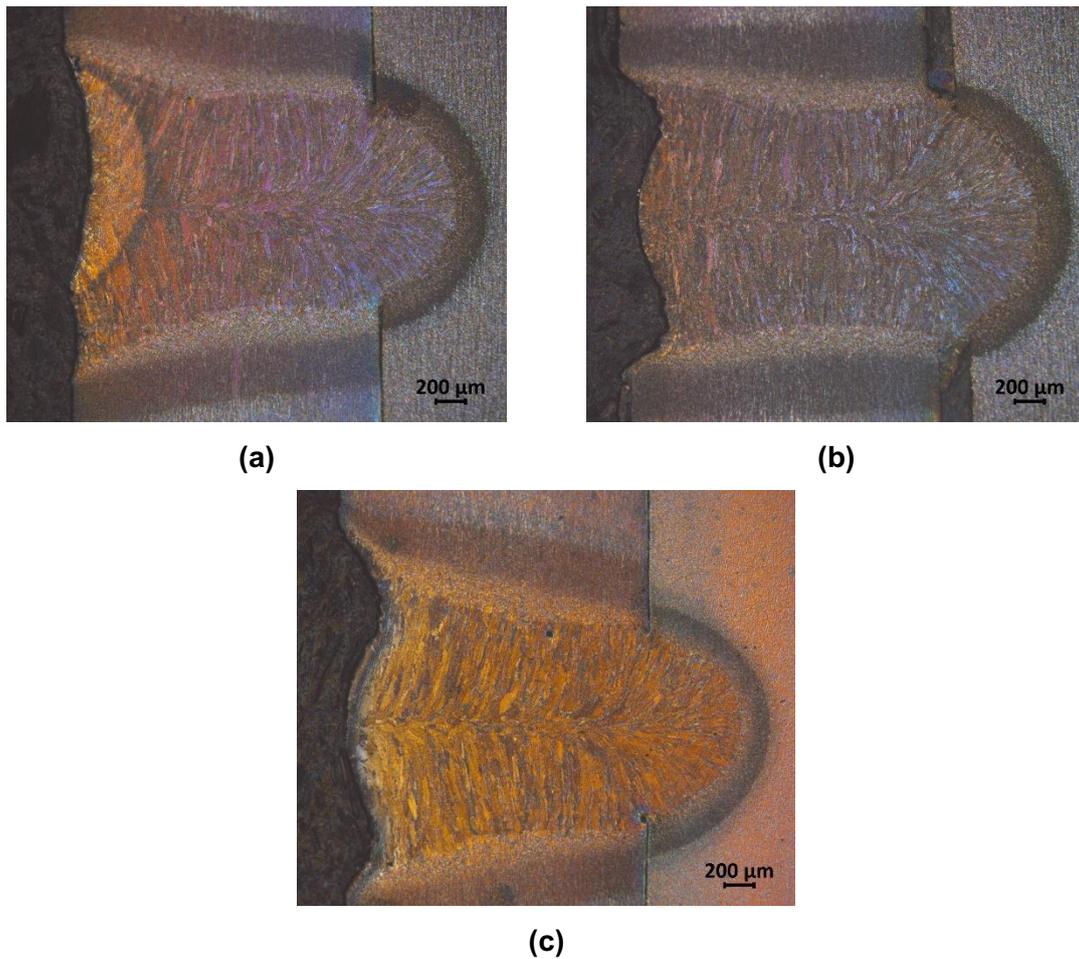


Figura 4.4 – Conjunto P04: (a) Cordão A - SS; (b) Cordão A - 180; (c) Cordão C – SS.

Tabela 4.5 – Resultados macrografia conjunto P04

Solda	Profundidade [μm]	Largura Topo [μm]	Largura Meio [μm]	Folga [μm]	
S04A-SS	2644,080	2161,080	1380,000	24,840	24,890
S04A-180	2834,520	2119,680	1679,460	182,881	219,685
S04C-SS	2764,140	2771,040	1312,380	20,700	19,320

#### 4.2.5. Resultados da análise macrográfica do conjunto P05

Com a decisão de projeto de se limitar a potência em 6000 W, o conjunto P05 foi soldado com a mesma potência do conjunto P03, isto é, 5750 W. A diferença entre eles foi a velocidade de soldagem. De acordo com a Tab. 3.2, houve a redução de 10 mm/min, tornando a velocidade de soldagem do conjunto P05 na faixa de 53 mm/min. Com isso, a Fig. 4.5 apresenta os efeitos da redução da velocidade.

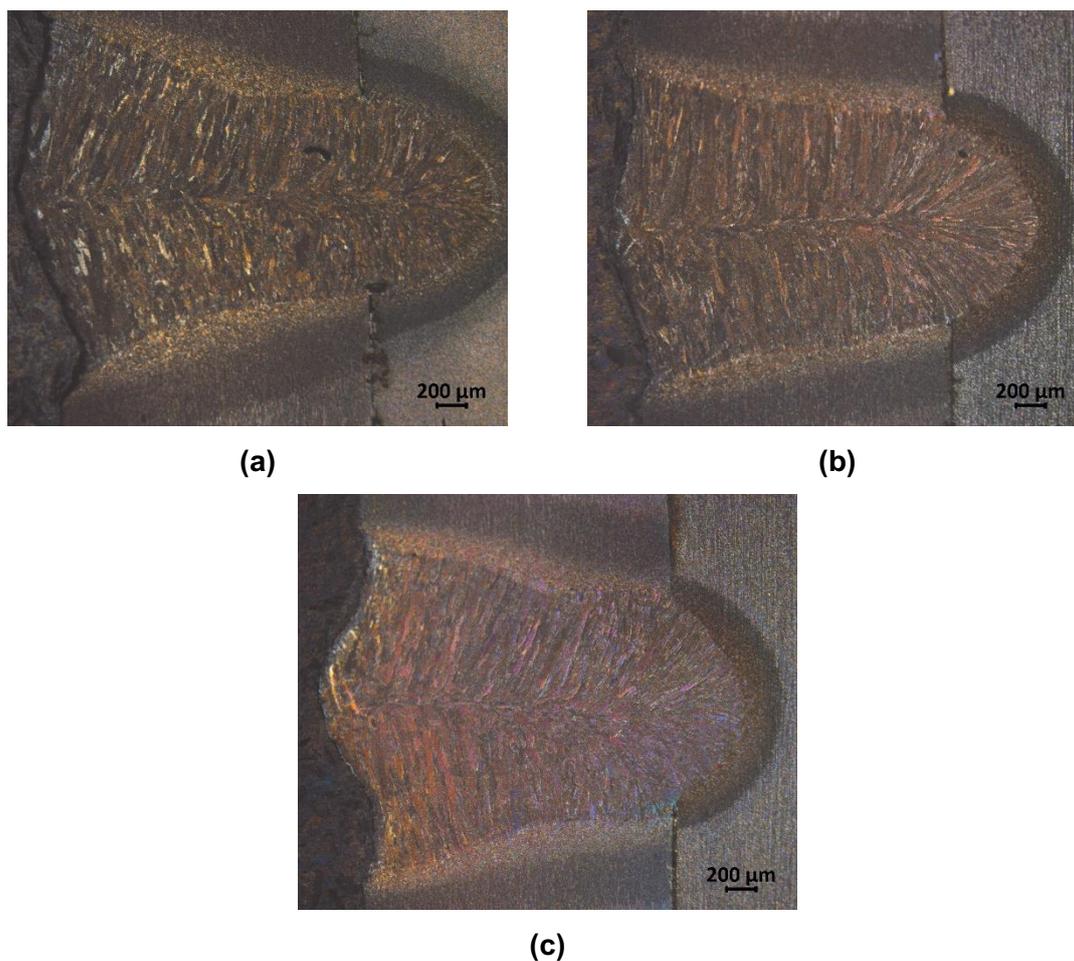


Figura 4.5 – Conjunto P05: (a) Cordão A - SS; (b) Cordão A - 180; (c) Cordão C – SS.

Tabela 4.6 – Resultados macrografia conjunto P05

Solda	Profundidade [μm]	Largura Topo [μm]	Largura Meio [μm]	Folga [μm]	
S05A-SS	2986,320	2554,380	1313,760	19,495	27,861
S05A-180	2844,180	2115,540	1345,500	28,937	12,348
S05C-SS	2602,680	2296,320	1440,720	9,660	19,320

#### 4.2.6. Resultados da análise macrográfica do conjunto P06

Por fim, para o último conjunto foi aplicada a mesma estratégia utilizada no conjunto P05. Ou seja, foi mantida a potência de 5750 W. Contudo, determinou-se que a velocidade de soldagem seria um valor intermediário aquelas utilizadas nos conjuntos P03 e P05, 63 mm/min e 53 mm/min, respectivamente. Ou seja, para o P06, foi utilizada a velocidade de 58 mm/min, como apresentado pela Tab. 3.2. A Figura 4.6 apresenta suas macrografias.

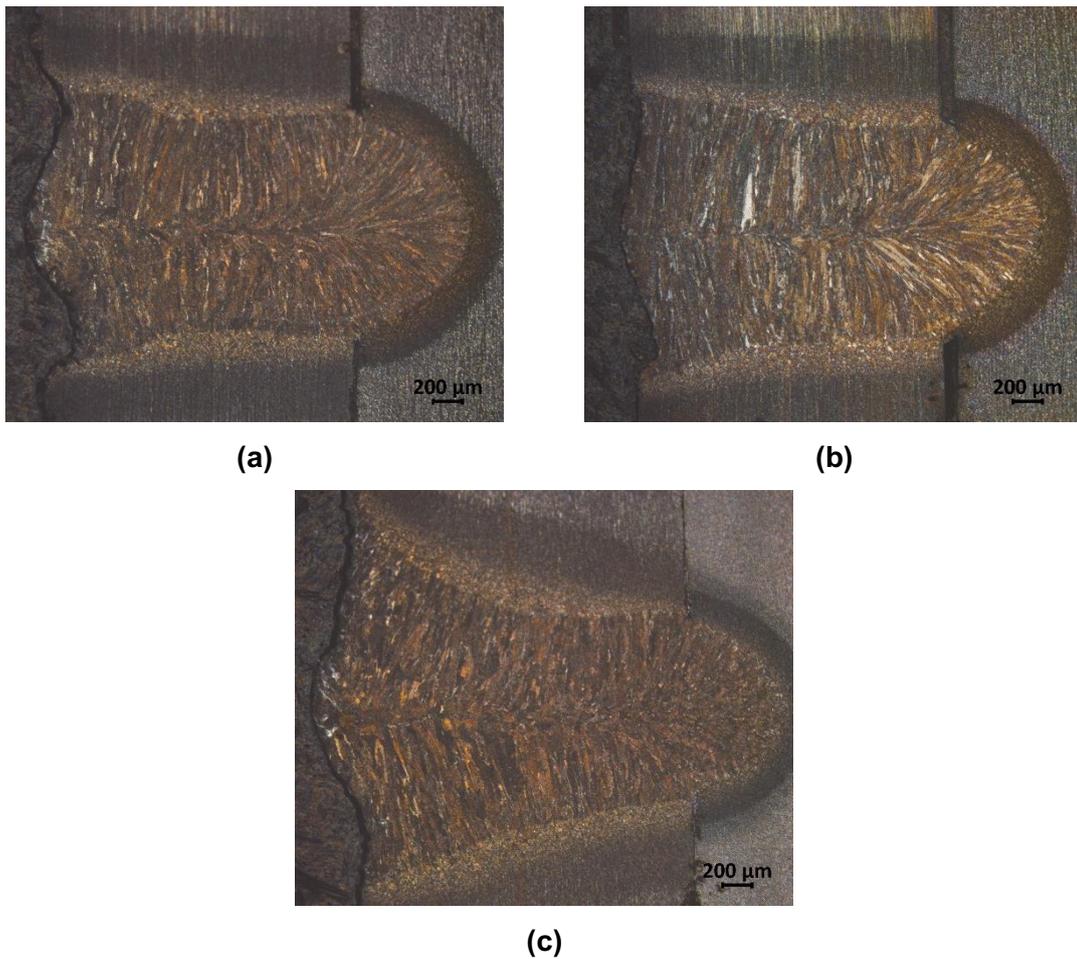


Figura 4.6 – Conjunto P06: (a) Cordão A - SS; (b) Cordão A - 180; (c) Cordão C – SS.

Tabela 4.7 – Resultados macrografia conjunto P06

Solda	Profundidade [μm]	Largura Topo [μm]	Largura Meio [μm]	Folga [μm]	
S06A-SS	2896,620	1893,360	1505,580	70,423	38,590
S06A-180	2793,120	2110,020	1426,920	97,980	95,498
S06C-SS	2830,380	2410,860	1186,800	12,285	9,660

#### 4.2.7. Resumo e discussões

Observando as Tabs. 4.2 a 4.7, algumas discussões são válidas. Primeiramente é importante ressaltar a ausência de união em duas juntas, sendo elas: S01A-SS e S02A-180. Observando as Figs. 4.1 e 4.2 é possível verificar nitidamente que não houve penetração suficiente do laser a fim de unir as duas peças.

Para um melhor entendimento os resultados da análise da macrografia são apresentados em forma de figuras. A Figura 4.7 mostra os valores de folga obtidos para todas as condições investigadas. Nesta figura se observa que as maiores folgas foram apresentadas

nos cordões identificados com a letra A, mais especificamente na seção 180. Com isso, pode-se entender que a região de solda constante foi suficiente para unir as chapas, entretanto a união apresentou consideráveis folgas quando comparada à região SS do mesmo cordão. Em outras palavras, para os mesmos parâmetros (materiais, potência e velocidade) a região SS, devido à maior energia de soldagem aplicada na região, proporcionou uma junta mais concisa.

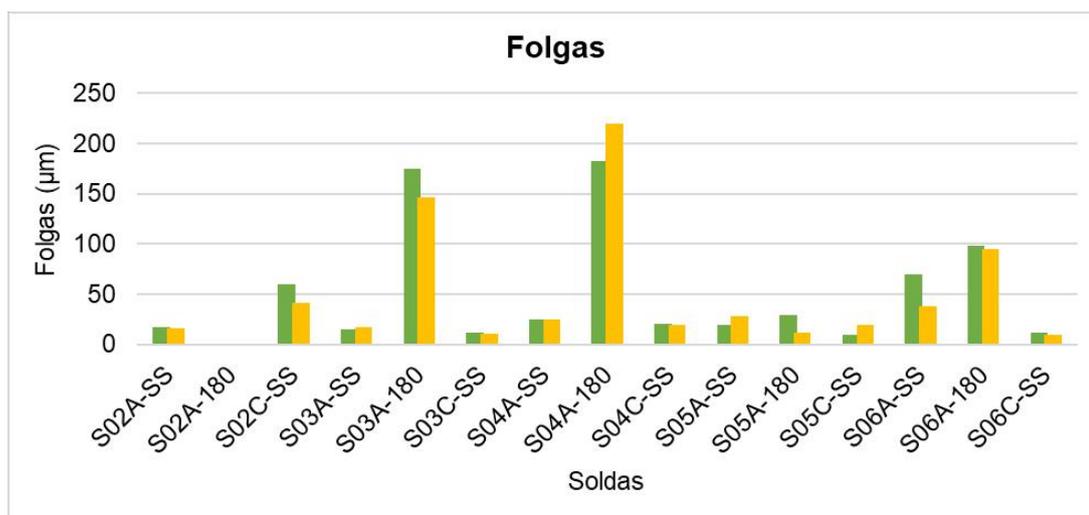


Figura 4.7 – Valores das folgas, em µm.

Observando as Figs. 4.1 a 4.6 é possível verificar que algumas juntas apresentaram perda de material ocasionada pela alta energia aplicada pelo laser. Destaca-se as juntas S02C-SS, ilustrada pela Fig. 4.2 (c) e todas as juntas executadas no conjunto P04, ilustradas em especial pela Fig. 4.4. Esse fato identificado corrobora com a Tab. 3.2, que ilustra a matriz de ensaios. Assim, é válido destacar a necessidade da decisão de limitar a potência do laser a 6000 W. Ainda, de acordo com observado anteriormente nas juntas sem união de peças, também para o conjunto P04, em especial nas juntas do cordão A região 180, foram apresentadas as maiores folgas, conforme Fig. 4.7.

Para os conjuntos P05 e P06, ambos com potência de 5750 W e velocidade de 53 mm/min e 58 mm/min respectivamente, foram obtidas macrografias muito semelhantes. Primeiramente, segundo a Fig. 4.8, destaca-se que o conjunto P05 apresentou maiores profundidades no cordão A, ou seja, entre os materiais Q e K. Já para o cordão C, entre os materiais C e K, o conjunto P06 obteve penetração ligeiramente maior.

Avaliando as medições da largura do cordão (topo) e da largura da intersecção das chapas (meio), apresentadas pela Fig. 4.9, é possível verificar que o cordão C do conjunto P04 contempla o valor máximo de largura de topo. Um fato que deve ser destacado é que o

mesmo comportamento não é observado para as seções do cordão A, sugerindo um efeito dos materiais utilizados.

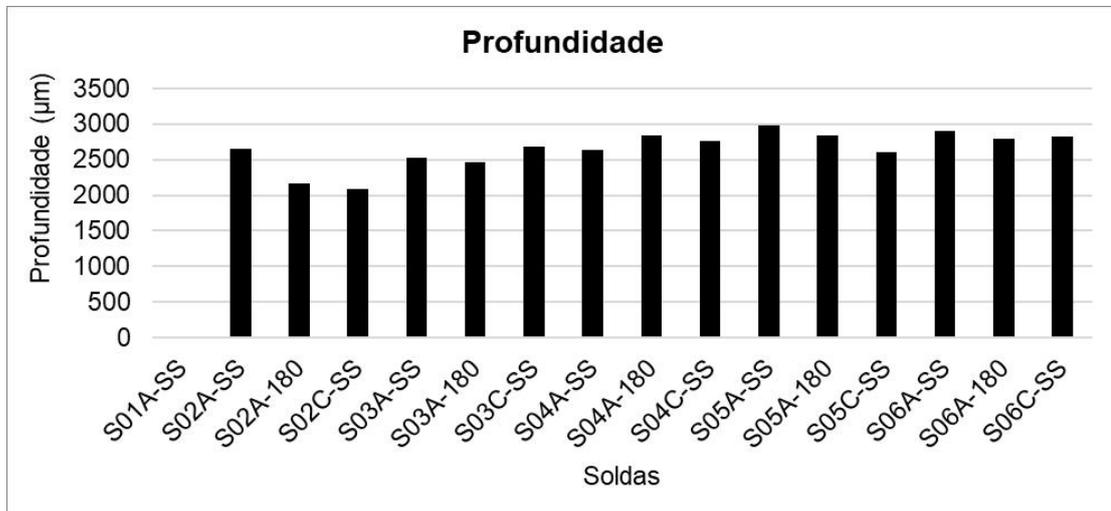


Figura 4.8 – Valores de profundidade, em µm.

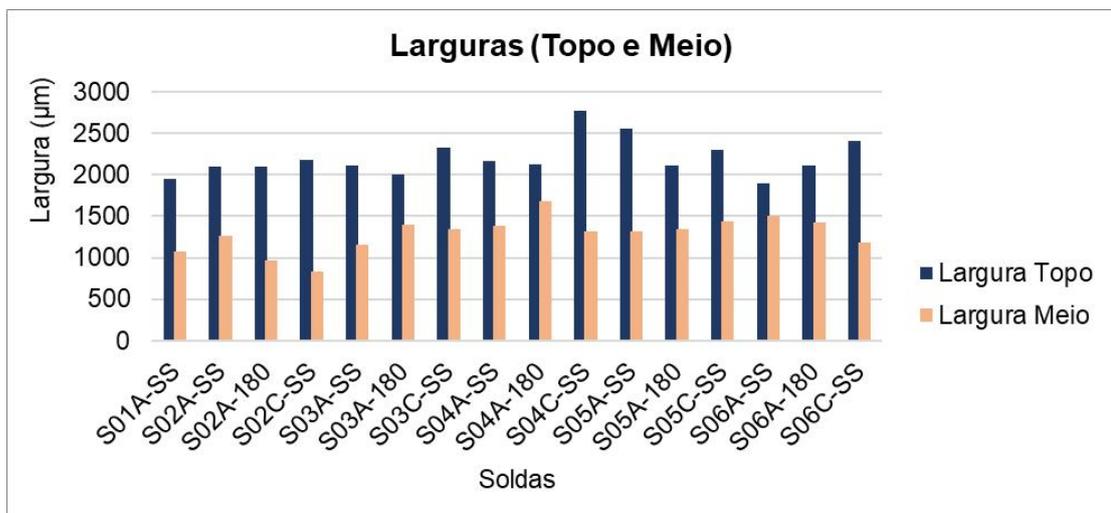


Figura 4.9 – Valores de largura, em µm.

#### 4.3. Resultados da medição de dureza

O perfil de dureza foi executado ao longo da seção transversal das juntas soldadas com o intuito de avaliar os efeitos ocasionados pelo alto aquecimento localizado proporcionado pela passagem do laser. Para tanto, foi realizado apenas um perfil linear de 16 pontos espaçados de 0,2 mm por junta, com carga de HV1. Destaca-se a ausência de medição para as juntas que não possibilitaram união de peças, sendo S01A-SS e S02A-180.

Como todos os perfis foram efetuados na chapa superior, mais especificamente no meio de sua espessura (a 1 mm da face superior), os resultados serão agrupados de acordo com a região da junta e os materiais utilizados. Isto é, de acordo com a Fig. 3.6, cada conjunto possui três regiões de interesse. Esta é divisão se dá a fim de avaliar quais parâmetros de soldagem proporcionaram maiores variações das propriedades mecânicas para a mesma localidade.

#### 4.3.1. Resultados da medição de dureza das juntas *Start-Stop* dos cordões A

Os cordões identificados pela letra A são compostos pelos materiais Q e K, ou seja, são responsáveis pelas juntas que unem o tubo de seção quadrada e a chapa K, parte superior dos conjuntos. Duas regiões foram analisadas para estes cordões, a Tab. 4.8 apresenta os resultados das medições de dureza das regiões de início e fim do cordão (*Start-Stop*).

Tabela 4.8 – Resultados das medições de dureza das juntas *Start-Stop* dos cordões A

<b>Distância (mm)</b>	<b>S02A-SS (HV1)</b>	<b>S03A-SS (HV1)</b>	<b>S04A-SS (HV1)</b>	<b>S05A-SS (HV1)</b>	<b>S06A-SS (HV1)</b>
0,0	259,41	282,47	258,20	275,89	260,37
0,2	293,66	293,93	298,98	285,11	304,02
0,4	292,38	293,97	341,85	293,54	304,02
0,6	309,28	321,65	327,49	310,34	302,30
0,8	341,88	356,71	363,41	347,89	354,53
1,0	331,82	311,19	379,77	323,08	311,06
1,2	320,26	327,31	374,90	353,22	343,80
1,4	325,87	316,56	372,47	318,36	325,98
1,6	347,69	307,56	379,53	329,04	331,79
1,8	339,74	309,34	377,24	317,03	329,78
2,0	337,70	312,90	394,40	323,32	320,05
2,2	322,19	322,14	382,01	323,32	312,94
2,4	352,02	343,95	372,17	300,63	304,04
2,6	322,12	293,94	370,31	303,59	295,54
2,8	329,72	299,04	348,12	304,12	285,83
3,0	287,44	297,34	309,36	293,23	268,79

Avaliando os dados expostos, é possível observar o aumento da dureza na região soldada para todas as juntas apresentadas. Como ilustrado pela Fig. 4.10, a junta S04A-SS proporcionou o maior endurecimento da região soldada, com valor máximo igual a 394,40 HV1, enquanto o metal de base possui dureza na faixa de 260 HV1. Avaliando a matriz de ensaio, destaca-se que o conjunto P04 foi constituído com a maior potência de laser utilizada, 6000 W. Sendo assim, é possível verificar a influência direta entre potência aplicada, gradiente de temperatura e consequentemente alteração das propriedades mecânicas, como dureza.

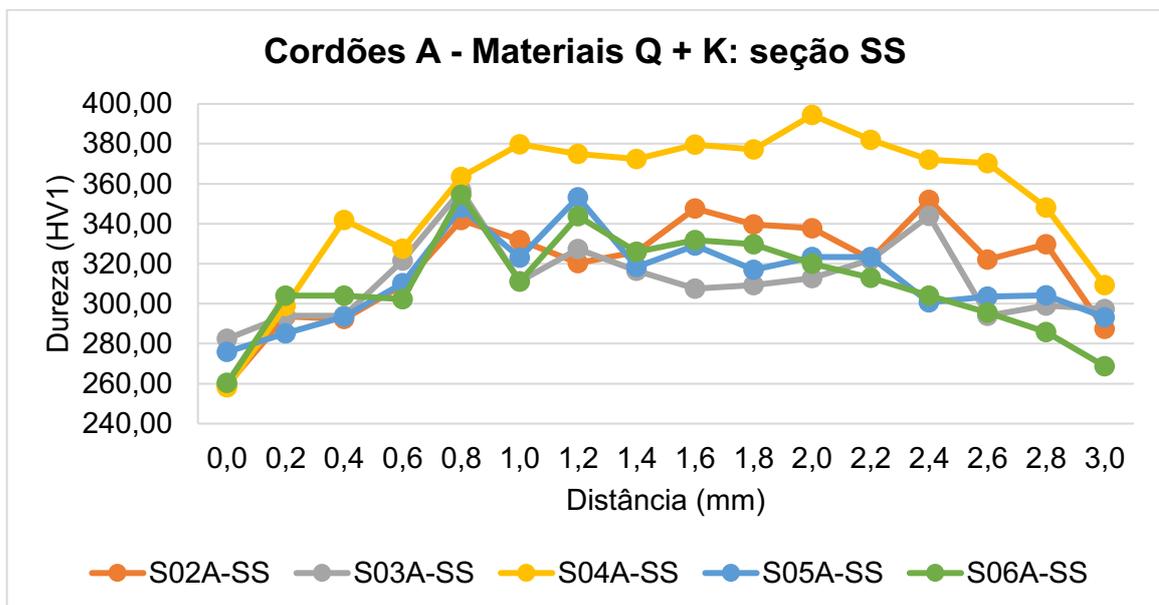


Figura 4.10 – Resultados das medições de dureza das juntas *Start-Stop* dos cordões A

#### 4.3.2. Resultado das medições de dureza das juntas 180 dos cordões A

De maneira similar às juntas SS, as juntas 180 também pertencem ao cordão A. Sua diferença base está na região de soldagem, que é contínua no sentido oposto. Com isso, os materiais utilizados nas duas juntas são os mesmos. A Tabela 4.9 apresenta os valores de dureza medidos, destaca-se a ausência das juntas S01A-180 e S02A-180 por falha na união do conjunto.

De acordo com os valores apresentados, a região de solda contínua proporcionou um endurecimento da microestrutura local similar à região de *Start Stop*. Entretanto, é possível verificar que houve uma menor disparidade entre os conjuntos, não havendo algum com valores destoantes. Ainda, vale destacar que o conjunto P03 apresentou valores ligeiramente maiores que os demais, com o máximo igual a 367,20 HV1. A Figura 4.11 apresenta a distribuição dos valores ao longo do perfil.

Tabela 4.9 – Resultados das medições de dureza das juntas 180 dos cordões A

Distância (mm)	S03A-180 (HV1)	S04A-180 (HV1)	S05A-180 (HV1)	S06A-180 (HV1)
0,00	276,82	284,19	239,93	250,74
0,20	240,27	302,20	284,18	309,37
0,40	316,45	316,62	285,88	284,31
0,60	310,98	358,78	303,52	290,68
0,80	325,94	339,83	325,66	343,89
1,00	331,60	339,81	316,61	309,33
1,20	354,18	337,78	309,23	333,72
1,40	358,51	331,84	322,14	333,79
1,60	367,20	331,73	314,61	318,45
1,80	354,60	331,75	327,14	323,55
2,00	354,56	335,49	305,68	329,81
2,20	341,66	341,78	337,73	321,84
2,40	335,80	297,06	314,64	333,08
2,60	363,42	300,49	327,91	311,14
2,80	307,60	300,52	307,59	325,91
3,00	276,63	300,65	297,32	275,51

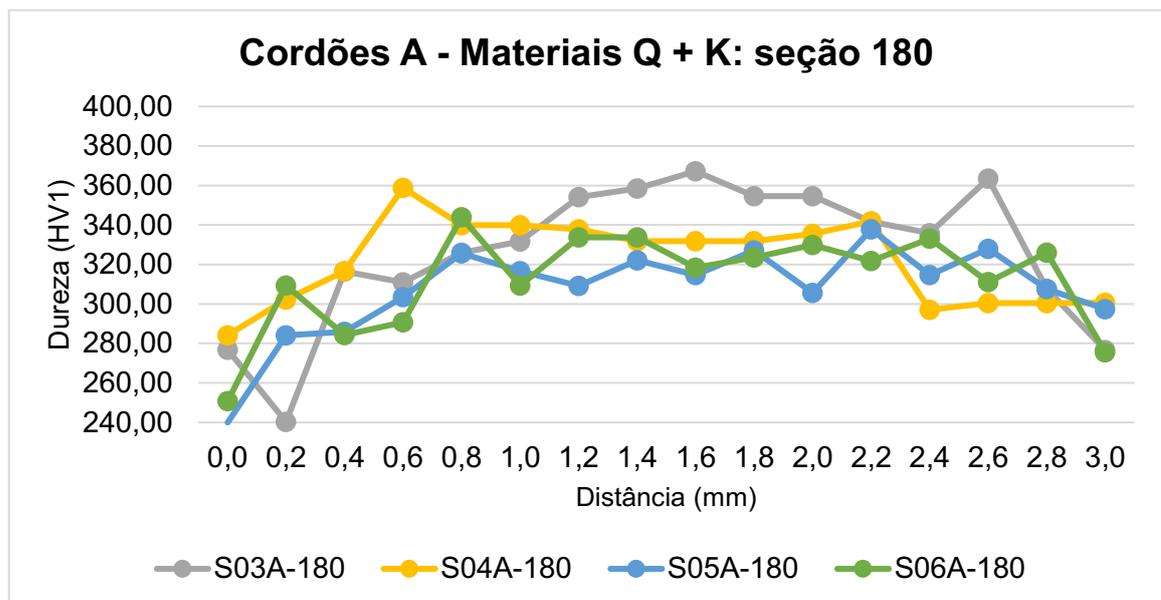


Figura 4.11 – Resultados das medições de dureza das juntas 180 dos cordões A

#### 4.3.3. Resultados das medições de dureza das juntas *Start-Stop* dos cordões C

Diferente das análises anteriores, as juntas desta seção são referentes ao cordão C, responsáveis pela união do perfil C e da chapa K superior. Destaca-se que a região de análise foi no início e fim (*Start Stop*) do cordão. A Tab. 4.10 apresenta os valores para os perfis analisados.

Avaliando a Fig. 4.12 e realizando uma comparação com Fig. 4.10, isto é, as duas regiões de início e fim de seus respectivos cordões, é possível concluir que mesmo com a diferença de materiais o comportamento do perfil se manteve, salve a exceção do conjunto P04 que suportou a condição mais extrema.

Tabela 4.10 – Resultados das medições de dureza das juntas *Start Stop* dos cordões C

<b>Distância (mm)</b>	<b>S02C-SS (HV1)</b>	<b>S03C-SS (HV1)</b>	<b>S04C-SS (HV1)</b>	<b>S05C-SS (HV1)</b>	<b>S06C-SS (HV1)</b>
0,0	301,73	264,76	260,89	251,43	262,02
0,2	288,93	256,80	257,85	287,57	293,84
0,4	289,84	302,39	266,33	302,30	273,51
0,6	298,67	310,90	290,73	293,94	318,08
0,8	290,79	308,59	309,25	350,29	352,41
1,0	339,83	339,67	341,73	305,85	333,65
1,2	365,73	356,79	302,22	314,34	335,70
1,4	352,32	348,12	316,37	300,44	360,81
1,6	363,44	346,02	333,75	304,31	333,64
1,8	320,31	318,41	341,76	309,38	341,53
2,0	292,22	293,43	316,54	293,76	298,62
2,2	303,79	320,11	347,94	298,94	305,80
2,4	298,31	312,99	333,67	284,39	363,36
2,6	298,93	345,90	337,67	324,08	314,48
2,8	275,08	341,90	343,96	314,62	327,93
3,0	256,78	314,76	324,06	282,76	307,57

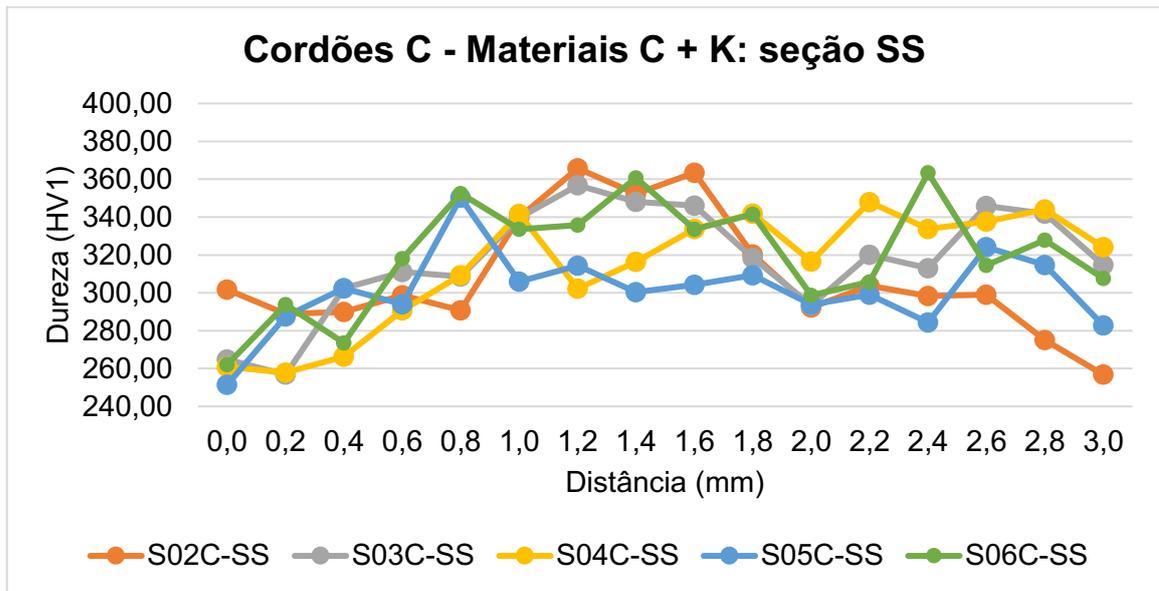


Figura 4.12 – Resultados das medições de dureza das juntas *Start Stop* dos cordões C

#### 4.4. Resultados da ANOVA

Esta seção apresenta os resultados da Análise de Variância – ANOVA. A análise foi realizada por meio do *software* STATISTICA. Para tanto, foi verificado o efeito estatístico da faixa de valores escolhidos para as três variáveis de entrada (materiais, potência do laser e velocidade de solda) nas características da solda, como dureza, profundidade, largura de topo, largura média e folgas. De acordo com a metodologia aplica, para valores p menores que 0,05 entende-se que há efeito estatístico significativo na variável de saída.

##### 4.4.1. Resultados de ANOVA para os efeitos dos parâmetros de soldagem nos valores de dureza

Os resultados da ANOVA para os valores de dureza estão mostrados na Tab. 4.11. A partir desta tabela é possível concluir que para as faixas de valores ensaiadas, nenhum dos fatores de entrada influenciou de forma estatisticamente significativa os valores de dureza para o nível de confiança de 95 %. O resultado está de acordo com Ming et al. (2022), que apresentam o fato que a micro dureza da região soldada em juntas de topo é influenciada pelo tipo de grão do material.

Tabela 4.11 – Resultados de ANOVA para o efeito dos fatores de entrada no valor máximo de dureza

Efeito	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	Valor F	Valor p
Intercepto	608610,3	1	608610,3	2913,791	0,000000
Materiais	2,9	1	2,9	0,014	0,908671
Potência	100,8	2	50,4	0,241	0,791049
Velocidade	259,7	2	129,8	0,622	0,561150
Erro	1671,0	8	208,9		
Total	610644,7	14	609002,3		

O gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a dureza é mostrado na Fig. 4.13. É possível verificar que os resíduos estão normalmente distribuídos. Ainda, destaca-se que a normalidade dos resíduos foi atestada para todas as ANOVAs realizadas. Para todas as ANOVAs realizadas o comportamento observado é similar e, portanto, não serão aqui apresentados todos os gráficos.

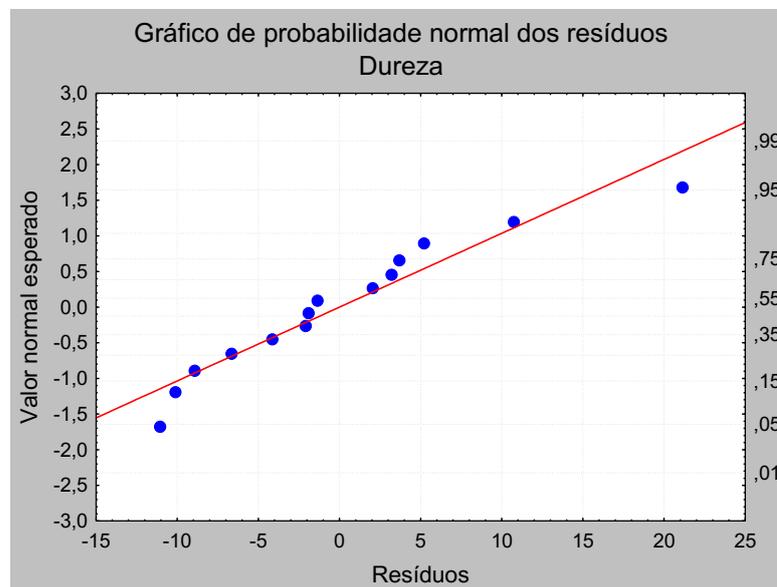


Figura 4.13 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para os valores de dureza HV1 das juntas soldadas variando os materiais, potência do laser e velocidade de soldagem.

#### 4.4.2. Resultados de ANOVA para os efeitos dos parâmetros de soldagem nos valores de profundidade

Os resultados da ANOVA para a profundidade das juntas, Tab. 4.12, apontam que apenas a faixa de valores de potência influenciou de forma estatisticamente significativa este

mensurando. Segundo Ming et al. (2022), a penetração do cordão de solda durante a soldagem a laser é afetada pela energia linear (Q). Por sua vez, a energia linear refere-se à entrada de energia para a solda por unidade de comprimento (W/mm).

Tabela 4.12 – Resultados de ANOVA para o efeito dos fatores de entrada no valor de profundidade

Efeito	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	Valor F	Valor p
Intercepto	37643568	1	37643568	1166,056	0,000000
Materiais	24585	1	24585	0,762	0,405523
Potência	297112	2	148556	4,602	0,042015
Velocidade	138842	2	69421	2,150	0,172441
Erro	290545	9	32283		
Total	38394652	15	37918413		

#### 4.4.3. Resultados de ANOVA para os efeitos dos parâmetros de soldagem nos valores de largura de topo do cordão

Os resultados da ANOVA para avaliação dos efeitos dos parâmetros de solda a respeito da largura de topo do cordão são apresentados pela Fig. 4.13. A partir destes dados é possível concluir que apenas os materiais influenciaram de forma estatisticamente significativa os valores de largura de topo. Os resultados são compatíveis com aqueles apresentados por Rai et al. (2007), que concluíram que a geometria da poça de fusão foi afetada pela difusividade térmica, coeficiente de absorção e pontos de fusão e ebulição, entre as várias propriedades físicas da liga.

Tabela 4.13 – Resultados de ANOVA para o efeito dos fatores de entrada no valor de largura de topo

Efeito	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	Valor F	Valor p
Intercepto	20176427	1	20176427	580,8445	0,000000
Materiais	246860	1	246860	7,1067	0,025798
Potência	115799	3	38600	1,1112	0,394331
Velocidade	64496	2	32248	0,9284	0,429979
Erro	312627	9	34736		
Total	20916209	16	20528871		

#### 4.4.4. Resultados de ANOVA para os efeitos dos parâmetros de soldagem nos valores de largura na intersecção das chapas

A Tabela 4.14 apresenta os resultados obtidos pela ANOVA realizada sobre os dados de largura da intersecção das chapas. A partir desta tabela é possível concluir que assim como para os valores de profundidade, apenas a faixa de valores para o parâmetro de potência foi capaz de influenciar a largura da região solda na intersecção das chapas. Como a região soldada possui formato coniforme (em V), quanto mais profunda a penetração, maior será a largura do meio. Sendo assim, o fato de ambos os valores sofrerem influência do mesmo parâmetro está correto.

Tabela 4.14 – Resultados de ANOVA para o efeito dos fatores de entrada no valor de largura da intersecção

<b>Efeito</b>	<b>Soma de quadrados</b>	<b>Graus de liberdade</b>	<b>Quadrados médios</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Intercepto	5922952	1	5922952	246,2303	0,000000
Materiais	48269	1	48269	2,0067	0,190279
Potência	333412	3	111137	4,6202	<b>0,032074</b>
Velocidade	8716	2	4358	0,1812	0,837257
Erro	216491	9	24055		
Total	6529840	16	6110771		

#### 4.4.5. Resultados de ANOVA para os efeitos dos parâmetros de soldagem nos valores de folga

A Tabela 4.15 mostra os resultados da ANOVA para os efeitos dos parâmetros variados neste trabalho nos valores das folgas laterais nas juntas. De acordo com os dados, para as faixas de valores ensaiadas, nenhum dos fatores investigados influenciou de forma estatisticamente significativa as folgas apresentadas. Sendo assim, uma hipótese que pode ser investigada no futuro é a relação entre o modo de fixação do conjunto na bancada, seu ponteamto e as folgas apresentadas.

Tabela 4.15 – Resultados de ANOVA para o efeito dos fatores de entrada nos valores de folga

Folga	Efeito	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	Valor F	Valor p
1	Intercepto	6700,25	1	6700,246	1,645171	0,235530
	Materiais	6822,29	1	6822,286	1,675136	0,231681
	Potência	1026,70	2	513,351	0,126047	0,883290
	Velocidade	4053,24	2	2026,619	0,497614	0,625621
	Erro	32581,40	8	4072,675		
	Total	51192,88	14	20135,177		
2	Intercepto	6641,90	1	6641,900	1,496345	0,256042
	Materiais	6409,44	1	6409,440	1,443974	0,263860
	Potência	3310,45	2	1655,225	0,372903	0,700101
	Velocidade	2374,57	2	1187,284	0,267482	0,771866
	Erro	35510,00	8	4438,751		
	Total	54246,36	14	20332,600		

De acordo com a aplicação prática dos conjuntos apresentados, é possível concluir que a resistência à fadiga das juntas é um fator preponderante na determinação da melhor parametrização de solda. Segundo Dourado et al (2014), o principal obstáculo à aplicação do método de soldagem a laser para grandes peças estruturais é que o das juntas soldadas a laser ainda não é bem compreendido. De acordo com Sajjad et al (2022), a resistência à fadiga para juntas soldadas é proporcionalmente dependente dos resultados de dureza. Dessa forma, é possível inferir que o P04 possuirá maior vida útil, sendo a melhor parametrização dentre as apresentadas na matriz de experimentos (potência do laser igual a 6000 W e velocidade de soldagem igual a 63 mm/min).

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÃO

Neste trabalho foi investigado o efeito da parametrização do processo de solda a laser em aços UHSS por meio da caracterização mecânica e metalográfica das juntas obtidas. Com isso foi possível estudar os efeitos de cada variável de entrada (materiais de base, potência do laser e velocidade de soldagem) nos parâmetros de qualidade da junta, entendendo como cada um influencia o resultado final a fim de obter uma parametrização ideal a ser utilizada. As principais conclusões são elencadas a seguir.

- a) Foi possível verificar que para a faixa de valores utilizados nenhum dos parâmetros de entrada influenciou estatisticamente de forma significativa o valor máximo de dureza do cordão de solda. Contudo, é possível concluir que na região de solda há um aumento da dureza em função do tratamento térmico ocasionado pelo aporte térmico adicionado pelo laser.
- b) Assim como observado para os valores de dureza, para as folgas entre as chapas não se observou influência estatística significativa de nenhum dos fatores investigados, para a faixa de valores utilizados.
- c) A potência do laser influenciou de forma estatisticamente significativa a profundidade da região soldada e a largura na intersecção das chapas. Ainda ressalta-se que nenhuma das juntas analisadas obteve penetração total.
- d) Foi verificado que os materiais possuem influência estatisticamente significativa na largura de topo do cordão. Como se trata de uma solda autógena, isto é, sem adição

de material, é possível concluir que as características das ligas utilizadas são responsáveis pelas características do cordão.

- e) A partir da análise dos resultados de dureza e da sua relação com a resistência à fadiga, conclui-se que para a aplicação proposta, o conjunto P04 (potência do laser igual a 6000 W e velocidade de soldagem igual a 63 mm/min) terá maior vida útil.

### **5.1. Sugestões para trabalhos futuros**

A seguir são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros:

- a) Avaliar o efeito dos elementos fixadores e o sistema de ponteamto nas folgas entre as chapas para as parametrizações apresentadas.
- b) Realizar ensaios experimentais a fim de determinar a parametrização necessária para atingir penetração total.
- c) Avaliar os cordões longitudinalmente e conseqüentemente suas propriedades mecânicas nesse sentido por meio de ensaios mecânicos destrutivos.
- d) Desenvolver metodologia para analisar o conjunto completo por meio de ensaios de fadiga, simulando sua utilização rotineira.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM A1011-18 **Standard Specification for Steel, Sheet and Strip, Hot-Rolled, Carbon, Structural, High-Strength Low-Alloy, High-Strength Low-Alloy with Improved Formability, and Ultra-High Strength**. American Society for Testing and Materials, 2018.

ASTM A1112-18 **Standard Specification for Cold-Formed Welded High Strength Carbon Steel or High-Strength Low-Alloy Steel Hollow Structural Sections (HSS) in Rounds and Shapes**. American Society for Testing and Materials, 2018.

ASTM E92-17 **Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials**. American Society for Testing and Materials, 2017.

FERRARI, M. A. **Laser de Nd:Ya para aplicações em lidar**. 2008. 99 f. Tese de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo.

FREITAS, F. H. C. **Estudo da influência dos parâmetros de solda a laser em juntas sobrepostas dos aços DP980 e TRIP780 com a utilização de ferramentas estatísticas**. 2022. 93 f. Tese de Doutorado – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

IPG – PHOTONICS. **Investor Guidebook**. Disponível em: <https://www.ipgphotonics.com>. Acesso em: 20 mar, 2023

KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 466p.

MODENESI, P. J.; MARQUES P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. 1 ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. 209p.

MING, D.; WENQUAN, W.; XINGE, ZHANG.; JIAFEI, NIU.; LIANG, LIU. Influence of laser power on microstructure and mechanical properties of laser welded TWIP steel butted joint. **Optics & Laser Technology**. Changcun, v. 149, p 107911, 2022.

RAI, R.; ELMER, J. W.; PALMER, T. A.; DEBROY, T. Heat transfer and fluid flow during keyhole mode laser welding of tantalum, Ti-6Al-4V, 304L stainless steel and vanadium. **Journal of Physics D: Applied Physics**. Londres, v. 40, p 5753, 2007.

GOYAL, R.; EL-ZEIN, M. Influence of laser weld shape on mechanical and fatigue behaviour of single lap laser welded joints. **Journal of Advanced Joining Processes**. Porto, v. 1, p 100018, 2018.

KLEPPNER, D. Rereading Einstein on radiation. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 27, n. 1, p 87-91. 2004. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S1806-11172005000100009> >. Acesso em 05 mar. 2023.

SAJJAD, M. B.; MOHAMMAD, H.; MOSTAFA, Z.; REZA, M. Cooling rate effects on fatigue life prediction using hardness measurements for in-service steel patch-welds with and without TIG dressing treatment. **Journal of Structures**. London, v. 50, p 1285-1302, 2023.